



UNIVERSIDAD DE GUADALAJARA

COORDINACIÓN GENERAL ACADÉMICA

Coordinación de Bibliotecas

Biblioteca Digital

La presente tesis es publicada a texto completo en virtud de que el autor ha dado su autorización por escrito para la incorporación del documento a la Biblioteca Digital y al Repositorio Institucional de la Universidad de Guadalajara, esto sin sufrir menoscabo sobre sus derechos como autor de la obra y los usos que posteriormente quiera darle a la misma.



UNIVERSIDAD DE GUADALAJARA

Centro Universitario de Ciencias Biológicas y Agropecuarias
División de Ciencias Biológicas
Departamento de Ciencias Ambientales

INSTITUTO DE NEUROCIENCIAS

**Efecto del aprendizaje inverso sobre la funcionalidad
cortical durante la toma de decisiones
en hombres jóvenes**

Tesis

que para obtener el grado de

**DOCTOR EN CIENCIA DEL COMPORTAMIENTO
(ORIENTACIÓN NEUROCIENCIA)**

presenta

Juan Pablo García Hernández

Comité tutorial

Dr. Miguel Ángel Guevara Pérez (Director)

Dra. Andrea Cristina Medina Fregoso

Dr. Félix Héctor Martínez Sánchez

Guadalajara, Jalisco

2022

Este trabajo se realizó en el laboratorio de Correlación Electroencefalográfica y Conducta del Instituto de Neurociencias de la Universidad de Guadalajara bajo la tutoría del Dr. Miguel Angel Guevara Pérez.
Con apoyo de beca CONACYT (822463)

Resumen

La toma de decisiones (TD) es un proceso cognitivo flexible que permite la adaptación conductual en relación con los cambios en las contingencias para lograr la meta en curso y, se ha dividido en tres fases temporal y funcionalmente distintas: 1) evaluación y formación de preferencias; 2) selección y ejecución de la acción y 3) evaluación del resultado. Se propone que la adecuada ejecución de las fases de formación de preferencias y de evaluación del resultado va a permitir la constante actualización y corrección de la conducta con el fin de lograr el objetivo fijado. Los paradigmas de aprendizaje inverso permiten evaluar la capacidad de cambiar la respuesta a las contingencias de refuerzo, la cual es modulada principalmente por la participación de las áreas orbitofrontal y ventromedial de la corteza prefrontal relacionadas con la inhibición de la respuesta preponderante. Sin embargo, también se requiere la actualización de la relación estímulo y resultado para lograr la adaptación conductual; en este proceso, otras áreas de la corteza prefrontal, como son la frontopolar y dorsolateral en conjunto con la corteza parietal, podrían estar involucradas dada su participación en la evaluación de diferentes tipos de estímulos. El objetivo del presente trabajo fue evaluar la funcionalidad de las cortezas prefrontal y parietal durante las fases de formación de preferencias y de evaluación del resultado de la TD, así como su relación con parámetros conductuales, en una condición de aprendizaje inverso. Se analizó tanto la potencia absoluta (PA) como la correlación electroencefalográfica (rEEG) de las fases de formación de preferencias y de evaluación del resultado de la TD. Durante la condición de aprendizaje inverso, la fase de formación de preferencias de la TD estuvo caracterizada por una mayor rEEG interhemisférica parietal en la banda alfa₂; mientras que la fase de

evaluación del resultado se caracterizó por una mayor PA de la corteza dorsolateral derecha en la banda theta y menor rEEG entre las áreas frontopolar derecha y dorsolateral derecha en la banda alfa1. Además, se encontró una mayor correlación negativa entre la actividad electroencefalográfica de la banda theta de la corteza prefrontal y el puntaje de la tarea de TD. Estos resultados sugieren que la adaptación a los cambios en las contingencias durante la toma de decisiones podría estar sustentada por la participación de las áreas frontopolar y dorsolateral, en conjunto con la parietal, las cuales estarían participando diferencialmente durante las fases de formación de preferencias y de evaluación del resultado.

Palabras clave: Toma de decisiones, aprendizaje inverso, corteza frontopolar, corteza dorsolateral, prefronto-parietal

Abstract

Decision-making (DM) is a flexible cognitive process that allows behavioral adaptation in relation to changes in contingencies to achieve the current goal and has been divided into three temporally and functionally distinct phases: 1) evaluation and training of preferences; 2) selection and execution of the action and 3) evaluation of the result. It is proposed that the adequate execution of the phases of the formation of preferences and evaluation of the result will allow the constant updating and correction of the behavior in order to achieve the established objective. Reverse learning paradigms allow evaluating the ability to change the response to reinforcement contingencies, which is mainly modulated by the participation of the orbitofrontal and ventromedial areas of the prefrontal cortex related to the inhibition of the preponderant response. However, updating the stimulus-outcome relationship is also required to achieve behavioral adaptation; In this process, other areas of the prefrontal cortex, such as the frontopolar and dorsolateral, together with the parietal cortex, could be involved given their participation in the evaluation of different types of stimuli. The objective of this study was to evaluate the functionality of the prefrontal and parietal cortices during the phases of preference formation and evaluation of the DM result, as well as its relationship with behavioral parameters, in a reverse learning condition. Both the absolute power (AP) and the electroencephalographic correlation (rEEG) of the phases of preference formation and evaluation of the DM result were analyzed. During the reverse learning condition, the preference formation phase of DT was characterized by increased parietal interhemispheric rEEG in the alpha2 band; while the outcome assessment phase was characterized by higher AP of the right dorsolateral cortex in the theta band and lower rEEG between the right frontopolar and dorsolateral areas in the alpha1 band. In addition, a greater negative correlation was found between the electroencephalographic activity of the theta band of the prefrontal cortex and the score of the DM task. These results suggest that adaptation to changes in contingencies during decision-making could be supported by the

participation of the frontopolar and dorsolateral areas, together with the parietal, which would be participating differentially during the phases of preference formation and evaluation of the result.

Contenido

Resumen	3
Abstract.....	5
Introducción.....	9
Antecedentes.....	11
Toma de Decisiones.....	11
<i>Fases de la Toma de Decisiones</i>	15
Aprendizaje Inverso.....	16
Corteza Prefrontal	19
<i>Corteza Frontopolar</i>	20
<i>Participación de la CFP en Procesos Cognitivos</i>	22
<i>Corteza Prefrontal Dorsolateral</i>	24
<i>Participación de la Corteza Dorsolateral en Procesos Cognitivos</i>	25
Corteza Parietal.....	26
<i>Participación de la Corteza Parietal en Procesos Cognitivos</i>	27
Actividad Electroencefalográfica (EEG)	29
<i>Banda Delta (δ)</i>	29
<i>Banda Theta (θ)</i>	29
<i>Banda Alfa (α)</i>	30
<i>Banda Beta (β)</i>	30
<i>Banda Gamma (γ)</i>	31
<i>Potencia Absoluta</i>	31
<i>Correlación Electroencefalográfica (rEEG)</i>	32
<i>Actividad EEG y Procesos Cognitivos</i>	32
Estado de la Cuestión.....	35
Planteamiento del Problema	37
Objetivos.....	38
Objetivo General.....	38
Objetivos Específicos	38
Hipótesis	39
Hipótesis General.....	39
Hipótesis Específicas	39

Método.....	41
Criterios de Inclusión.....	41
Escalas y Pruebas.....	42
Tarea de Toma de Decisiones.....	45
Registro EEG.....	49
Análisis Estadístico.....	50
Diagrama Experimental.....	51
Variables.....	52
<i>Independientes</i>	52
<i>Dependientes</i>	52
Recursos.....	53
Consideraciones Éticas.....	54
Resultados.....	55
Resultados Conductuales.....	57
<i>Puntaje Relativo</i>	57
<i>Tiempo de Reacción</i>	60
Resultados Electroencefalográficos.....	61
<i>Potencia Absoluta (PA)</i>	62
<i>Correlación Interhemisférica</i>	64
<i>Correlación Intrahemisférica</i>	65
<i>Resultados Correlacionales</i>	66
Discusión.....	69
Conclusiones.....	77
Referencias Bibliográficas.....	78
Anexos.....	96
Anexo 1. Consentimiento Informado.....	96
Anexo 2. Entrevista de Datos Generales.....	97
Anexo 3. Inventario Edimburgo (Lateralidad).....	98
Anexo 4. Neuropsi Subescalas Atención y Concentración.....	99
Anexo 5. Escala de Inteligencia de Wechsler para Adultos.....	102
Acta de Comité de Ética.....	105

Introducción

La toma de decisiones es una función ejecutiva que involucra diferentes procesos cognitivos. Ernst y Paulus (2005) propusieron su división en 3 fases, cada una con una funcionalidad y temporalidad diferente: fase 1) formación de preferencias; fase 2) selección y ejecución de la acción y fase 3) evaluación del resultado. Por sus características individuales, cada fase es necesaria para la actualización y corrección constante de la conducta y se han asociado a diferentes patrones de actividad cortical.

Para la adecuada ejecución de estas fases, se requiere procesar múltiples estímulos para lograr la meta en curso. Entre mayor sea la capacidad del sujeto para calificar y procesar estos estímulos de manera simultánea, mejor será su desempeño en la toma de decisiones (Sheppard et al., 2013; Wenzlaff et al., 2011), de ahí que su adecuada ejecución requiera de diversos procesos cognitivos tales como el aprendizaje asociativo, la memoria de trabajo, la inhibición, la flexibilidad cognitiva, entre otros.

La flexibilidad cognitiva se refiere a la capacidad de ajustar el comportamiento en concordancia con las modificaciones del entorno. Diferentes tareas han sido utilizadas para evaluar la flexibilidad cognitiva, entre las que se encuentran las de *reversal learning* (a las cuales nos referiremos como “aprendizaje inverso”), en donde el objetivo es reaprender o cambiar una asociación entre el estímulo y la consecuencia previamente establecida. En tales tareas de aprendizaje inverso se deben detectar los cambios durante el curso de la tarea y modificar las respuestas para generar nuevas asociaciones con el fin de lograr el objetivo planteado y adaptar la conducta a la nueva condición (Frank & Claus, 2006). Este proceso necesita de la detección de errores, inhibición de la respuesta a estímulos anteriormente

recompensados y superar la evitación de estímulos previamente castigados (Greening et al., 2011), procesos que podrían estar implicados de manera serial en cada una de las fases de la toma de decisiones. Además de la actualización de la información en la relación estímulo-resultado.

Inicialmente, con estudios de neuropsicología y después con estudios fisiológicos, se obtuvo evidencia de la participación de diferentes áreas corticales (como la corteza prefrontal orbitofrontal y la corteza parietal) durante tareas de aprendizaje inverso, principalmente durante la inhibición de la respuesta preponderante y en el cambio de respuesta hacia el estímulo. Sin embargo, hay discrepancia y falta de evidencia respecto a cuál es el papel de áreas de la corteza prefrontal como la frontopolar y dorsolateral en este proceso. Ambas áreas corticales están relacionadas estrechamente con el razonamiento en las funciones cognitivas, referidas a la evaluación, manipulación y monitoreo de la información en la memoria de trabajo y, por ende, en la toma de decisiones. En este sentido, por sus características funcionales, estas áreas corticales podrían estar participando, en conjunto durante tareas de aprendizaje inverso.

Por lo anterior, este trabajo está enfocado en investigar el funcionamiento de las áreas frontopolar y dorsolateral, así como su sincronización con áreas posteriores (corteza parietal) durante una tarea de aprendizaje inverso o de inversión durante la toma de decisiones en hombres jóvenes. Para cumplir con dicho objetivo se propuso usar la técnica electroencefalográfica para evaluar la activación y el grado de acoplamiento funcional entre las diferentes áreas corticales y, en este caso, durante el aprendizaje inverso en las diferentes fases de la toma de decisiones.

Antecedentes

Toma de Decisiones

Entre las distintas definiciones, algunos autores se refieren a la toma de decisiones (TD) como la habilidad de procesar múltiples alternativas para escoger un curso óptimo de acción en búsqueda de una meta personal en un contexto particular (Castelli et al., 2010; Walton et al., 2007).

La TD está presente en las diferentes actividades de los individuos, desde decisiones aparentemente inequívocas hasta las que parecen tener mayor dificultad. En los dos escenarios hay una opción preponderante sobre las demás, lo cual dependerá de diversos factores. Por ejemplo, en situaciones como rechazar o aceptar un ascenso laboral, se toman en cuenta factores como lo que se quiere (valores) y lo que se obtendrá (consecuencia); la dificultad de esta elección aumenta a la par con los riesgos o incertidumbres asociados a las diferentes alternativas que se presentan. Al integrar esta información se le atribuye un valor a cada opción y se estiman los posibles resultados, siendo esto un proceso fundamental para la toma de decisiones (Koechlin & Hyafil, 2007; Smith & Kosslyn, 2008; Walton et al., 2007; Wang, 2008).

Debido a la cantidad de información y operaciones que se realizan, la TD requiere de diferentes procesos cognitivos tales como la memoria de trabajo, la cual es necesaria para el mantenimiento de los objetivos, el monitoreo de los estados en las opciones y la recuperación de la información relevante de las opciones, así como del procesamiento de los estímulos presentes en la tarea y la estimación de posibles consecuencias (Krawczyk, 2002; Martínez Selva et al., 2006; Platt, 2002).

Gold y Shadlen (2007) proponen que en el proceso de TD hay varios elementos de diferentes categorías que interactúan entre sí cuando hay más de una opción a elegir. Una

categoría está formada por elementos “en el mundo” o del exterior, los cuáles son independientes a la persona y dependen más del contexto en donde se lleva a cabo la toma de decisiones; la categoría “del cerebro” o del interior, la cual está formada por procesos dependientes del sujeto. Los elementos de la primera categoría hacen referencia, por ejemplo, a la cantidad de estímulos a elegir o a las características físicas de éstos; mientras que los elementos de la segunda categoría hacen referencia, por ejemplo, al procesamiento que lleva a cabo el tomador de decisiones antes, durante y después de la elección. Los elementos de ambas áreas interactúan entre sí para una adecuada ejecución de la TD (Figura 1).

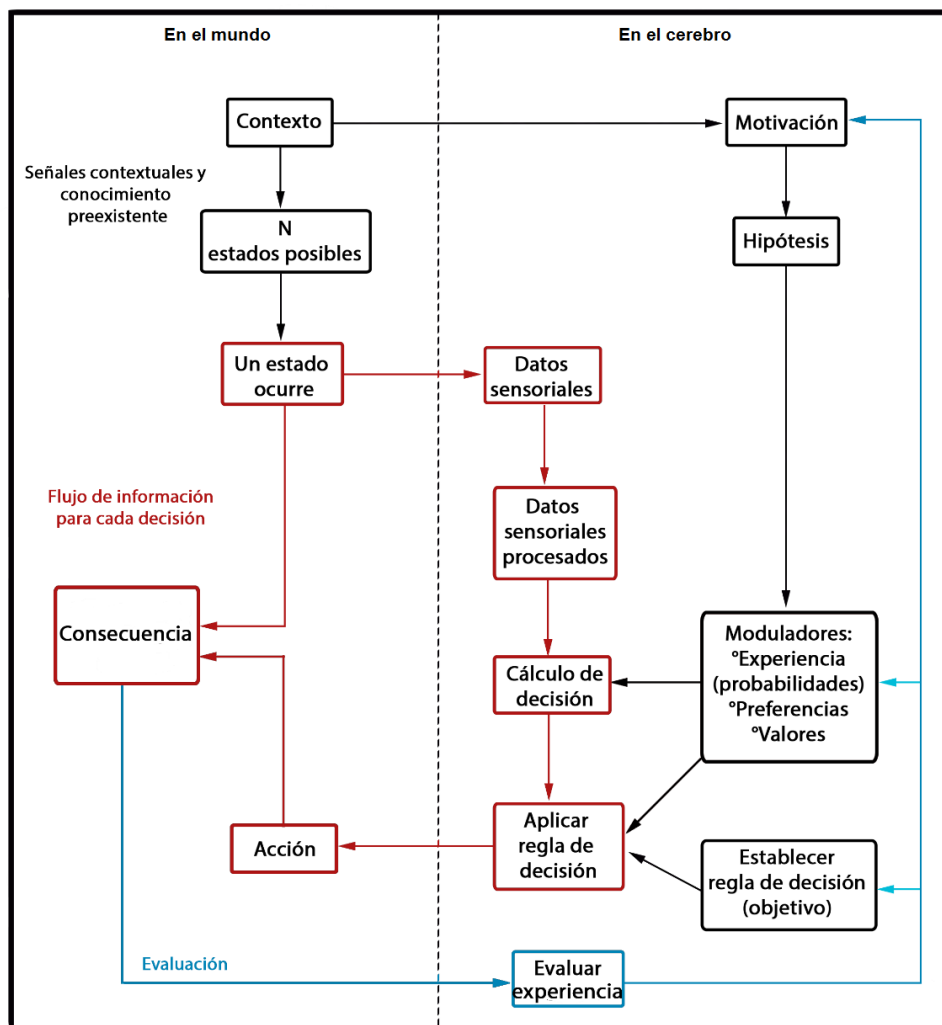


Figura 1. Elementos que conforman el modelo de TD entre dos alternativas propuesto por Gold y Shadlen. Los elementos del lado izquierdo representan a los pertenecientes a la categoría del exterior o del entorno. Mientras que los elementos del lado derecho representan a la categoría del interior (modificado de Gold y Shadlen, 2007).

Así mismo, Wang (2008) refiere tres características del proceso de elección entre estímulos dentro de la toma de decisiones: 1) las alternativas de elección no son simples respuestas reflexivas sino que involucran acciones dirigidas a objetivos en donde se evalúa el resultado y se toma en cuenta para futuras situaciones; 2) algo esencial en las decisiones controladas es el proceso de acumulación de información y la relevancia del estímulo; y, 3) el riesgo es inherente en gran parte de las decisiones por la incertidumbre sobre las consecuencias a largo plazo.

En la TD influye el aprendizaje del contexto, en donde se llevan a cabo asociaciones entre los estímulos y el resultado para guiar la conducta con el objetivo de lograr la meta (Clark et al., 2004; Marschner et al., 2005). Así, el aprendizaje asociativo se logra con mayor eficiencia cuando los eventos ocurren repetidamente y transcurre poco tiempo entre el estímulo y el resultado de cada uno (Ernst & Paulus, 2005). Además, en algunos de los paradigmas de TD, prevalece elegir ciertos estímulos sobre otros como una medida de preferencia hacia éstos (formación de preferencias) (Ernst & Paulus, 2005), donde los estímulos elegidos suelen estar asociados con mayores recompensas. Es así que el procesamiento de recompensas y el aprendizaje asociativo de recompensas son componentes importantes en el proceso de toma de decisiones (Marschner et al., 2005).

Entonces, la TD se considera un proceso dinámico en el que la relación entre lo que elegimos y los resultados no es fijo, sino que el resultado de las elecciones puede verse afectado por diferentes aspectos del contexto (Brehmer, 1996; Walton et al., 2007). Por lo

tanto, la TD es una función ejecutiva que permite adaptarse constantemente al medio ambiente en búsqueda de maximizar las ganancias y minimizar las pérdidas; se fija un objetivo y se llevan a cabo una serie de elecciones para lograrlo. La flexibilidad en el establecimiento de preferencias y estrategias conductuales permiten adaptarse a los cambios en el entorno (Greening et al., 2011; Wang, 2008).

Así, se ha propuesto que para poder ejecutar la TD se necesita efectuar una representación mental del problema, planificar las posibles respuestas, ejecutar el plan y evaluar el resultado para poder detectar posibles errores y corregirlos (Kristan, 2008; Tirapu-Ustárroz & Luna-Lario, 2008). Esto permite evaluar las diferentes opciones para determinar cuál ayudará a conseguir el objetivo establecido (Smith & Kosslyn, 2008). La TD es más eficiente cuando el individuo que decide tiene conocimiento sobre el contexto del problema, sobre los distintos cursos de acción, así como sobre las consecuencias tanto inmediatas como futuras de cada una de las posibilidades (Ustárroz et al., 2012). En otras palabras, la ejecución adecuada de la TD se fundamenta en la evaluación de múltiples opciones de respuesta, seguida de la selección de la respuesta que se considera óptima (Clark et al., 2004).

Tomando en cuenta las ideas planteadas en los modelos mencionados anteriormente y el papel del aprendizaje en la TD, Ernst y Paulus (2005) plantean una división tanto temporal como funcional de la TD, tras analizar los comportamientos en común y tomando como estructura básica la evaluación y la formación de preferencias entre posibles opciones (*input* y *process*, respectivamente), la selección y la ejecución de una acción (*output*) y la evaluación del resultado (*feedback*). En el siguiente apartado se describirán cada una de las fases propuestas.

Fases de la Toma de Decisiones

- **Fase 1.** *Evaluación y formación de preferencias entre posibles opciones (input y process):* siendo esta la fase inicial, es donde se presentan los diversos estímulos que serán las opciones para elegir; después de una evaluación de estas opciones se forman las preferencias. Dicha formación de preferencias va a depender de diferentes factores, como las características de los resultados pronosticados por las opciones: valencia (positiva, negativa), saliencia (intensidad, magnitud), probabilidad (grado de certeza) y tiempo (retardo). Otros factores a considerar son el número de opciones para seleccionar, la experiencia previa con dichas opciones (incluido el resultado asociado a la opción); además del contexto tanto externo como interno en el que se toman las decisiones (Ernst & Paulus, 2005).
- **Fase 2.** *Selección y ejecución de una acción (output):* en esta fase se inicia, realiza y completa una respuesta de acuerdo con las preferencias establecidas durante la fase anterior; la acción llevada a cabo es consecuencia de la valoración previa. De los distintos procesos implicados para ejecutar la acción se encuentran la inhibición de otras respuestas, el implementar acciones secuenciales y la sincronización de las acciones (Ernst & Paulus, 2005).
- **Fase 3.** *Evaluación del resultado (feedback):* en esta fase y, como consecuencia de la ejecución de la respuesta en la fase anterior, se obtiene un resultado y se lleva a cabo una valoración de éste con el objetivo de establecer un aprendizaje asociativo entre el estímulo seleccionado y el valor del resultado obtenido. Con esto se lleva a cabo una posible actualización de las preferencias al comparar el resultado pronosticado con el real y, por ende, las respuestas se vuelven más eficientes para lograr la meta

establecida. Con la asociación entre los estímulos y los resultados se van facilitando respuestas hacia las opciones que presentan valores mayores; mientras que, se suprimen las respuestas a las opciones con valores menores. Al igual que en la fase 1, las características físicas de los estímulos influyen en su evaluación, sin embargo, ambas fases difieren en su función principal: en la fase 1 el formar preferencias basadas en valores esperados; en la fase 3 el asociar el valor real de las opciones (Ernst & Paulus, 2005).

Con base a la descripción anterior y tomando en consideración el diferente procesamiento que se lleva a cabo en cada fase de la TD se propone que la adecuada ejecución de las fases 1 y 3 permite la constante actualización de la información y la corrección de la conducta con el fin de lograr la meta en curso. La capacidad de ajustar el comportamiento en concordancia con las modificaciones del entorno es conocida como flexibilidad cognitiva, y la capacidad de cambiar la respuesta a las contingencias de refuerzo es una parte de la flexibilidad cognitiva que puede ser evaluada usando tareas de aprendizaje inverso (Dickstein et al., 2010; Groman et al., 2013; Ramírez et al., 2012).

Aprendizaje Inverso

Las tareas de aprendizaje inverso (*reversal learning*) son usadas para evaluar la flexibilidad en procesos de adaptación; cuando una respuesta deja de producir la recompensa asociada y se debe elegir, iniciar y mantener una nueva respuesta. En estos paradigmas, hay una extinción de la antigua asociación y la adquisición de una nueva (D'Cruz et al., 2011; Hauser et al., 2015; Izquierdo et al., 2017; Klanker et al., 2013).

En tales tareas se presentan estímulos que pueden denominarse A y B; los participantes aprenden por ensayo y error que “A”, pero no “B”, es recompensado. Esta primera condición es considerada como **aprendizaje inicial**. Luego, sin previo aviso, la relación de estímulo-recompensa cambia, de modo que los participantes deben aprender que ahora se recompensa “B”, pero no “A”, esta condición es denominada como **aprendizaje inverso** (Adleman et al., 2011; Clark et al., 2004). En estas tareas, el sujeto debe adaptar su conducta a los cambios que ocurren en el ambiente, como lo es el cambio del estímulo recompensado, modificando su comportamiento en curso; es decir, se debe detectar los cambios en la relación estímulo-resultado para implementar una nueva respuesta y alcanzar la meta en curso (Frank & Claus, 2006).

Así, algunas tareas de aprendizaje inverso consisten en dos estímulos (A y B), en donde uno es recompensado, pero no el otro, para posteriormente cambiar las contingencias. Sin embargo, se han usado variaciones del paradigma, ya sea por el modelo de estudio o por el objetivo en específico a evaluar, dando como resultado tareas de aprendizaje inverso tanto probabilísticas como determinísticas. También existen modificaciones en donde el número de estímulos a asociar es mayor a dos, esto con el objetivo de ralentizar el aprendizaje, reducir el uso de estrategias simples y distinguir con mayor facilidad si hay errores durante el aprendizaje (Boulougouris et al., 2007; Groman et al., 2013; Izquierdo et al., 2017; Kosaki & Watanabe, 2012; Ragozzino & Rozman, 2007; Wilson & Gaffan, 2008).

Entonces, el aprendizaje inverso se refiere a la capacidad de adaptación del comportamiento de acuerdo con los cambios en la asociación estímulo-recompensa (D’Cruz et al., 2011; Greening et al., 2011). Teóricamente, diferentes estudios en humanos, primates no humanos y roedores han revisado la noción de que las tareas de aprendizaje inverso miden principalmente el proceso de inhibición de la respuesta previamente aprendida (Izquierdo

et al., 2017). En este sentido, diferentes estudios, la mayoría de neuroimagen, han reportado la participación de las áreas orbitofrontal y ventromedial (zonas de la corteza prefrontal) durante el aprendizaje inverso en la codificación del valor del estímulo, así como para la inhibición de la respuesta preponderante (Fellows & Farah, 2003; Frank & Claus, 2006; Guevara et al., 2009).

Sin embargo, otros abordajes teóricos parten de que, para un desempeño óptimo en la tarea, la estrategia adaptativa depende del uso de reglas en conjunto con el aprendizaje de recompensa, y no simplemente de la inhibición de la respuesta (Izquierdo et al., 2017; Salvador et al., 2000). Es decir, se requiere reaprender cuando las asociaciones anteriores han cambiado, respondiendo a lo opuesto o anteriormente irrelevante (Frank & Claus, 2006), por lo que se necesita de la detección de errores, inhibición de la respuesta a estímulos anteriormente recompensados, y superar la evitación de estímulos previamente castigados (Greening et al., 2011).

Entonces, además de la inhibición de la respuesta preponderante, proceso relacionado a la participación de las áreas orbitofrontal y ventromedial, se ha reportado que en las tareas de aprendizaje inverso se requiere de la actualización de la información respecto a la relación entre el estímulo y el resultado (Nashiro et al., 2011, 2013). Por lo que las áreas frontopolar y dorsolateral de la corteza prefrontal, las cuales participan en el mantenimiento y manipulación de diferente tipo de información en la memoria de trabajo (Christoff & Gabrieli, 2000) podrían estar reclutándose para dicha actualización de la información en la adaptación conductual.

Sobre lo anterior, hay estudios que reportan discrepancia sobre la participación del área dorsolateral de la corteza prefrontal durante tareas de aprendizaje inverso. Por un lado, se ha reportado la participación de esta corteza durante el mantenimiento de la información

relevante para la tarea en curso (Frank & Claus, 2006; Xue et al., 2013); por otro lado, Fellows y Farah (2003) reportaron que los pacientes con una lesión en esta zona cortical no mostraron diferencias en la ejecución de una tarea de aprendizaje inverso.

Los estudios de neuropsicología han evidenciado que las estructuras prefrontales tienen mayor participación durante el aprendizaje inverso respecto a la fase de asociación estímulo-respuesta inicial (Daum et al., 1991). Sin embargo, incluso los procesos cognitivos que se podrían considerar como simples involucran patrones de redes cerebrales entre diferentes áreas cerebrales (Decker et al., 2017). En este sentido, se ha reportado que las áreas prefrontales no son las únicas que se activan durante las diferentes tareas, refiriendo la participación en conjunto con la corteza parietal durante la ejecución tanto de tareas de toma de decisiones como de tareas donde se evalúa la flexibilidad cognitiva (Andersen & Cui, 2009; Axelrod et al., 1996; Grant et al., 2000).

Con base en lo anterior es que en las siguientes secciones se describirán, de manera general, la localización anatómica y algunas funciones de las diferentes áreas de la corteza prefrontal (en específico la corteza frontopolar y la corteza dorsolateral), así como de la parietal, las cuales han sido implicadas en los procesos cognitivos de la toma de decisiones y que podrían estar participando de manera diferencial durante la evaluación de los estímulos en la adaptación conductual.

Corteza Prefrontal

La corteza prefrontal es esencial para el procesamiento cognitivo complejo, sin embargo, su función depende de sus conexiones con otras estructuras (Fuster, 2001). Debido a su funcionalidad, citoarquitectura y neurofisiología se ha sugerido que no es una región

homogénea, por lo que se ha propuesto su división en diferentes subregiones (Christoff & Gabrieli, 2000).

Fuster (2001), propuso la división de la corteza prefrontal en dorsolateral, medial y orbital. Posteriormente, mediante estudios de neuroimagen, principalmente, han evidenciado la activación de la parte más anterior de la corteza prefrontal, la corteza frontopolar, durante la ejecución de tareas cognitivas complejas (Christoff & Gabrieli, 2000).

Hay evidencia de que cada región de la corteza prefrontal contribuye de manera distinta en la toma de decisiones (Krawczyk, 2002). Para fines del presente escrito nos centraremos en las áreas frontopolar y dorsolateral, por sus componentes más cognitivos que afectivos (Ernst & Paulus, 2005), así como con su conectividad con la corteza parietal.

Corteza Frontopolar

La corteza frontopolar (CFP) se encuentra localizada en el área 10 de Brodmann, la parte más anterior de lóbulo prefrontal. En específico, la CFP corresponde a la subdivisión 10p (Figura 2) (Buriticá-Ramírez & Pimienta-Jiménez, 2007).

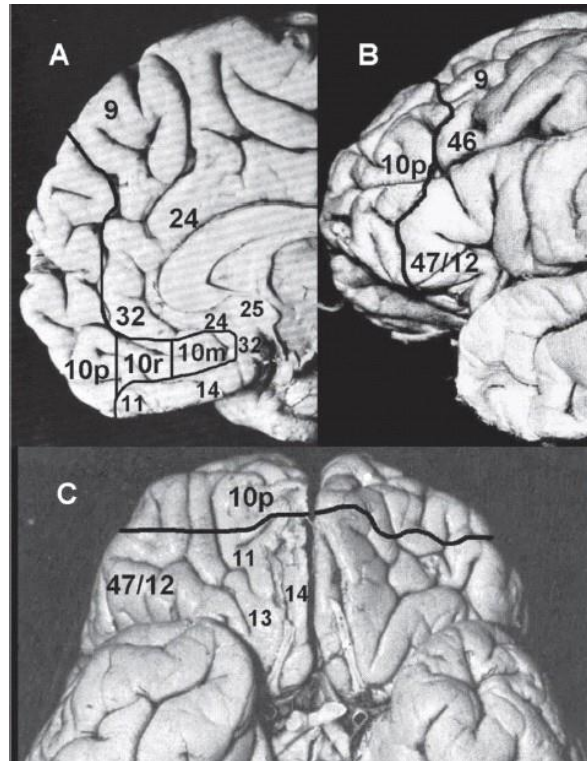


Figura 2. Corteza Frontopolar (equivalente al área 10p) del humano. A: vista medial del área 10p de acuerdo con la nomenclatura de Öngür et al., (2003). B: vista lateral del área 10p, según la nomenclatura de Petrides y Pandya (1999). C: área 10p en la superficie orbital de la corteza prefrontal, según la nomenclatura de Öngür et al., (2003) (tomado de Buriticá-Ramírez y Pimienta-Jiménez, 2007).

Esta estructura cerebral, la CFP, se ha reportado solamente en primates, lo cual podría estar relacionado con el desarrollo filogenético de la especie. Sin embargo, en los humanos presenta características únicas: tiene mayor volumen en proporción respecto al resto de los primates, además de tener una densidad neuronal menor y una mayor arborización dendrítica en comparación con las otras subregiones de la corteza prefrontal, por lo que se ha propuesto que estas características anatómicas permiten más espacio para la conectividad dentro de la estructura cerebral y entre estructuras. Además de que esta dicha estructura presenta una maduración postnatal tardía, la cual podría estar relacionada a cambios estructurales del área

dependientes a la experiencia y al desarrollo de algunas funciones ejecutivas (Jacobs, 2001; Mansouri et al., 2017; Semendeferi et al., 2001).

También, la CFP tiene diversas conexiones aferentes cortico-corticales originadas en áreas multimodales y de orden superior, lo que agrega otro aspecto neuroanatómico diferencial a otras áreas prefrontales. Estas aferencias se originan en: corteza cingulada anterior, corteza prefrontal dorsolateral, corteza prefrontal medial, corteza prefrontal orbitofrontal, corteza cingulada posterior, corteza parahipocampal, corteza retrosplenial, giro temporal superior, surco temporal superior, corteza temporal y corteza prefrontal ventrolateral. Además de tener conexiones con estructuras subcorticales (núcleo dorsomedial del tálamo y núcleo caudado (Buriticá-Ramírez & Pimienta-Jiménez, 2007; Mansouri et al., 2017).

Participación de la CFP en Procesos Cognitivos

Las características neuroanatómicas de la CFP, mencionadas en la sección anterior, sugieren que tiene un papel importante en los procesos cognitivos. En este sentido, mediante algunos estudios se ha dado a conocer la participación de esta corteza en tareas que involucran a la memoria prospectiva (Okuda et al., 1998), a la evaluación de incertidumbre (Yoshida & Ishii, 2006), razonamiento y resolución de problemas (Koechlin et al., 1999; Koechlin & Hyafil, 2007; Strange et al., 2001), procesos de multitareas (Koechlin et al., 1999), la reasignación de la atención (Pollmann, 2001) y el recibir recompensa (Boorman et al., 2011; Knutson et al., 2003).

También se ha visto involucrada la participación de la CFP en tareas de alta demanda cognitiva y cuando se requiere cumplir subobjetivos; es decir, cuando se tiene que cumplir

con una serie de objetivos para lograr un objetivo global o más complejo. Por lo que Ramnani y Owen (2004) proponen que esta área está involucrada en procesos cognitivos complejos.

Debido a que la conectividad de la CFP es, principalmente, con otras áreas prefrontales, algunos autores han propuesto que unas de las principales características funcionales de esta estructura es la generación interna de información y la manipulación y monitoreo de ésta (Christoff & Gabrieli, 2000). En este sentido, se ha evaluado su participación en paradigmas centrados en pensamientos espontáneos, “soñar despierto”, procesamiento de la información posterior a la exposición a estímulos externos, etc. Aunado a una constante, que podría ser el pensamiento generado en ausencia de estímulos externos.

En este contexto del pensamiento autogenerado, se ha reportado que la CFP participa en la detección de errores durante la ejecución de tareas (Rubia et al., 2003) al mediar entre la información interna y externa. Por lo que podría estar participando durante tareas que evalúan la flexibilidad cognitiva, como son las de aprendizaje inverso.

Además, mediante distintas técnicas se ha obtenido evidencia sobre la participación de la corteza frontopolar durante la ejecución de diversos paradigmas de toma de decisiones. Por ejemplo, un estudio reportado por Yoshida e Ishii (2006) en el cual participaron 13 sujetos con edades entre 23 y 28 años, quienes fueron entrenados en una tarea de elecciones entre diferentes alternativas con el objetivo de llegar a una meta. Dicha tarea consistía en un laberinto virtual en donde los participantes tenían que llegar a la ubicación meta. En la condición experimental, se le presentaba al participante la posición meta durante 4 segundos y después era colocado en otro punto del laberinto con la instrucción de llegar a la meta. Para lograr lo anterior, el participante tenía que elegir constantemente entre continuar hacia adelante, girar a la izquierda o girar a la derecha, realizado lo anterior, la ubicación se actualizaba y se le volvían a presentar las opciones hasta llegar a la meta. En la condición

control, de igual manera se le presentaba a los participantes la posición meta durante 4 segundos y eran posicionados en otro punto del laberinto, sin embargo, se les indicaba que dirección tomar hasta llegar a la meta, por lo que no tenían que elegir, sino efectuar la instrucción dada. Durante la condición experimental se reportó una mayor activación de la CFP en comparación con la condición control.

En un estudio realizado en nuestro laboratorio se evaluaron 30 participantes hombres, que ejecutaron un paradigma de toma de decisiones, que evalúa las tres fases propuestas por Ernst y Paulus (2005) previamente mencionadas, mientras se registraba la actividad eléctrica cerebral de las áreas frontopolares. Se encontró mayor grado de acoplamiento interhemisférico en la banda de frecuencias gamma, así como una mayor activación de la misma banda únicamente durante la fase de selección y ejecución de la acción (fase 2 de la toma de decisiones) en la CFP. La presencia de la banda gamma, tanto en la frecuencia de disparo como en el grado de acoplamiento, podría darnos indicios sobre la funcionalidad de la estructura en la integración y manipulación de la información previo a emitir una respuesta, en este paradigma de toma de decisiones (García-Hernández, 2019).

Corteza Prefrontal Dorsolateral

La Corteza Prefrontal Dorsolateral (CPFD) corresponde a las áreas 8, 9, 10, 44, 45, 46 y 49 de Brodmann. Sin embargo, algunos autores la limitan a las áreas 9 y 46 (Petrides & Pandya, 1999). Mientras que el área 9 (parte dorsal y superior) es referida, principalmente, en el procesamiento visual no espacial, el área 46 (área que rodea el surco principal) está relacionada con el procesamiento visoespacial en la memoria de trabajo (Levy & Goldman-Rakic, 2000).

Participación de la Corteza Dorsolateral en Procesos Cognitivos

El área dorsolateral de la corteza prefrontal es una de las principales áreas relacionadas al mantenimiento y manipulación de la información en la memoria de trabajo (Krawczyk, 2002). Además, mediante estudios en pacientes con una lesión en esta área se ha visto su participación en la planificación y organización de la conducta (Pedrero Pérez et al., 2011).

Christoff y Gabrieli (2000) hacen un contraste entre la funcionalidad del área cortical frontopolar y dorsolateral, concluyendo en que la primera participa en la evaluación generada internamente, mientras que la segunda en la evaluación de la información generada externamente (relacionada a estímulos).

Dentro de los procesos de flexibilidad cognitiva, el área dorsolateral juega un papel importante en la inhibición y el cambio de respuesta al estímulo (Kim et al., 2012); sin embargo, tratándose concretamente de tareas de aprendizaje inverso, existen evidencias que hablan sobre su participación mientras que otras refieren que no es necesaria durante este proceso (Fellows & Farah, 2003; Frank & Claus, 2006; Rolls et al., 1994; Xue et al., 2013).

Entre los trabajos que han reportado su participación en el aprendizaje inverso, se encuentra el de Hampshire, Chaudhry, Owen y Roberts (2012), quienes, usando la técnica de resonancia magnética funcional, reportaron una mayor activación de esta área durante el cambio de estímulo recompensado. Los autores refieren que esta mayor activación podría estar relacionada con el control de la atención a los estímulos. En otro estudio, utilizando la estimulación magnética transcraneal y, con base en los resultados obtenidos, los autores sugieren que la corteza dorsolateral está relacionada con la adaptación conductual necesaria para lograr la meta en curso tras los cambios en la contingencia de la tarea (Albein-Urios et al., 2019). Así mismo, por sus conexiones con la corteza del cíngulo anterior, se ha

reportado que la corteza dorsolateral participa en el ajuste de la conducta en función de las demandas del contexto (Silton et al., 2010).

Por su parte, Dixon y Christoff (2014) resaltan la importancia de la participación de esta corteza en respuesta al conflicto generado por las diferentes opciones disponibles a elegir, por lo que podría estar participando en la evaluación de nuevas respuestas hacia diferentes estímulos cuando la anterior deja de ser beneficiosa.

Corteza Parietal

El lóbulo parietal puede ser considerado como “corteza de asociación”, debido a que integra información visual, auditiva y somatosensorial con el propósito de guiar el comportamiento (Wright & Hodgson, 2015).

Esta corteza constituye aproximadamente una quinta parte de la corteza cerebral (Wright & Hodgson, 2015) y se encuentra localizada inmediatamente posterior al surco central y sobre la fisura lateral (Kandel et al., 2013). Dicha corteza se ocupa en gran medida de sensaciones somáticas y juega un papel importante en la guía visual del comportamiento motor, en la percepción visual y en la cognición (Kandel et al., 2013) (Figura 3).

La corteza somatosensorial se encuentra en el giro postcentral, perteneciente a la parte anterior del lóbulo parietal (áreas 3, 1 y 2 de Brodmann). La porción posterior se divide en parietal superior (áreas 5 y 7) que es un área somatosensorial y en parietal inferior (áreas 39 y 40) que tiene entradas somatosensoriales y visuales (Kandel et al., 2013) (Figura 3).

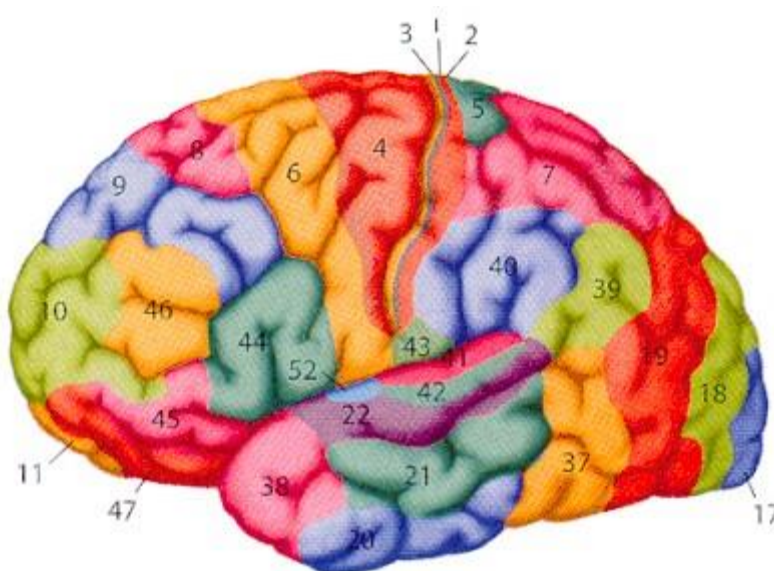


Figura 3. Mapa de Brodmann donde se observan las áreas pertenecientes a la corteza parietal (áreas 1, 2 3, 5, 7 39 y 40 de Brodmann).

Participación de la Corteza Parietal en Procesos Cognitivos

El lóbulo parietal también es esencial en funciones cognitivas como la atención, el procesamiento numérico y la memoria de trabajo (Andersen & Cui, 2009; Wright & Hodgson, 2015). Además, diversos estudios, tanto de neuroimagen como de lesiones cerebrales, muestran su participación durante diferentes procesos de la toma de decisiones. Principalmente, se ha asociado su participación en la codificación de las opciones y en el proceso previo a elegir. Diversos estudios de neuroimagen han mostrado su activación durante la incertidumbre en distintos paradigmas de toma de decisiones, es decir, cuando se desconoce el resultado asociado a cada uno de los estímulos presentados para elegir (Paulus et al., 2001; Vickery & Jiang, 2009; Yoshida & Ishii, 2006).

La corteza parietal posterior tiene conexiones con estructuras en la corteza prefrontal dorsolateral, las cuales están involucradas en la planeación y ejecución de movimientos de

los ojos y las manos, así como conexiones con áreas visuales, somatosensoriales y motoras (Andersen & Cui, 2009; Kandel et al., 2013). También es importante en la integración sensorial y somatosensorial con la toma de decisiones, lo cual incluye centrar la atención sobre un objeto externo, componentes afectivos y cognoscitivos, factores motivacionales y la iniciación del movimiento intencional (Greenstein & Greenstein, 1999). Por ejemplo, se ha reportado que para la correcta ejecución de Wisconsin Card Sorting Test, una prueba que consiste en clasificar tarjetas individuales en 4 diferentes mazos con diferentes cambios imprevistos de instrucciones a lo largo de la tarea, se requiere de la participación en conjunto de ambas estructuras (Grant et al., 2000).

La adaptación a los cambios inesperados en la relación estímulo-recompensa requiere de la actualización y manipulación de la información por medio de la memoria de trabajo para lograr consolidar el aprendizaje (Doya, 2008), por lo que en tareas de aprendizaje inverso, la corteza parietal parece tener participación en el cambio de respuesta hacia los estímulos previamente asociados, en conjunto con la corteza dorsolateral como parte de un circuito (Hampshire & Owen, 2005).

Como se describió anteriormente, hay evidencia de que para la adecuada ejecución de los diferentes procesos cognitivos se requiere de la participación tanto individual como en conjunto de diferentes estructuras cerebrales. En este sentido, la técnica electroencefalográfica permite evaluar la activación de diferentes estructuras, así como su conectividad con otras áreas y sus cambios en breves escalas de tiempo dada su alta resolución temporal (Decker et al., 2017), de donde se obtienen, de entre otros índices, la potencia absoluta y la correlación electroencefalográfica.

Actividad Electroencefalográfica (EEG)

Mediante la técnica de la electroencefalografía se obtiene el registro de la actividad electroencefalográfica (EEG) en tiempo real. Para este registro se colocan electrodos en el cuero cabelludo para obtener un registro de EEG cortical (Ramos-Argüelles et al., 2009). De esta manera, los electrodos recogen las oscilaciones de voltaje originadas por corrientes iónicas intra y extraneuronales generadas por grandes poblaciones de neuronas, las cuales están dispuestas en forma radial a la superficie craneana. La actividad registrada corresponde a la activación sincrónica de estas poblaciones neuronales y sus variaciones de voltaje se encuentran en rangos de amplitudes que van desde $-100 \mu\text{V}$ hasta $+100 \mu\text{V}$ y en frecuencias por debajo de 100 Hz (casi siempre entre 0.5 y 50 Hz) (Guevara et al., 2015). Además, a la señal registrada se le aplica la Transformada Rápida de Fourier para que las variaciones de voltaje se descompongan en frecuencias, las cuales son agrupadas en diferentes bandas o ritmos electroencefalográficos, cada una con características propias y con una participación diferencial en diferentes procesos cognitivos (Decker et al., 2017).

Banda Delta (δ)

Este término para la banda de frecuencias de 1 a 3.5 Hz fue acuñado por Walter (1936), su amplitud va desde los 100 hasta 200 μV (Niedermeyer & da Silva, 2005). Este ritmo se observa durante la meditación y durante actividades que requieren concentración (Harmony et al., 1996).

Banda Theta (θ)

Esta banda EEG fue nombrada así por Walter y Dovey (1944). Su rango de frecuencias, en humanos, se encuentra entre 4 a 7.5 Hz y tiene una amplitud cercana a los 70 μV

(Niedermeyer & da Silva, 2005). La presencia de esta banda se puede observar durante las primeras fases ondas lentas en el sueño, y también en eventos recompensantes como la obtención de reforzadores (Christie & Tata, 2009). Durante tareas que demandan procesos ejecutivos, se ha visto su implicación durante la manipulación de la información de la memoria de trabajo (Sauseng et al., 2004).

Banda Alfa (α)

Esta banda EEG se encuentra en frecuencias de 8 a 13 Hz. Esta banda está relacionada a estados de relajación durante la vigilia y en procesos y pruebas de atención donde están involucrados estímulos visuales (Harmony et al., 1996). Por su reactividad, esta banda ha sido dividida en alfa1 (8-10 Hz) y alfa2 (10-12 Hz); mientras que la banda alfa 1 ha sido relacionada a procesos de atención la alfa2 se ha relacionado con memoria semántica a largo plazo (Klimesch, 1997; Wolfgang Klimesch, 1996, 1999).

Banda Beta (β)

La banda beta corresponde a frecuencias que van de los 13 hasta los 30 Hz. Se ha reportado principalmente en regiones frontales del cerebro y su aparición se ha observado durante la vigilia, sobre todo cuando el individuo tiene los ojos abiertos en respuesta a algún estímulos y estados donde el individuo se encuentra bajo estrés (Guevara et al., 2015). La banda beta también ha sido dividida en dos sub-bandas: beta1 (13.5-19.5 Hz) y beta2 (19.5-30 Hz) (Liu, Shi, Zhao, y Yang, 2008).

Banda Gamma (γ)

Este ritmo de EEG está comprendido por frecuencias de 30 a 50 Hz y presentan una amplitud promedio de 10-20 μ V. Esta banda ha sido relacionada a la mediación de funciones motoras, así como con los pensamientos abstractos y el procesamiento de información compleja (Rieder et al., 2011).

Además, a los datos obtenidos del registro electroencefalográfico se les puede dar diferentes tratamientos matemáticos para obtener diferentes mediciones con las cuales, de manera cuantitativa, se puede interpretar la actividad cortical registrada. Dentro de estos valores se encuentran los de potencia absoluta y correlación electroencefalográfica.

Potencia Absoluta

Mediante la Transformada Rápida de Fourier (TRF) se obtienen los componentes de frecuencia que constituyen a la señal EEG para calcular la amplitud de cada uno de ellos y agruparlos en bandas de frecuencia particulares (previamente descritos). Estas amplitudes constituyen el espectro de amplitudes de la señal a estudiar. El espectro de potencias absolutas de una señal es el espectro de amplitudes elevado al cuadrado, es decir, el área bajo la curva corresponde a la potencia absoluta. Además, al sumar todos los valores de potencia absoluta (en todas las frecuencias del espectro) se llama potencia absoluta total. La relevancia de estos valores recae en su origen neuronal, donde al haber mayor reclutamiento neuronal se obtendrá una mayor potencia absoluta, la cual podrá ser diferenciada por su frecuencia de disparo entre grupos neuronales (Guevara, y Hernández-González, 2020).

Correlación Electroencefalográfica (rEEG)

El valor de la correlación electroencefalográfica (rEEG) se obtiene de un índice matemático con el que se determina la covariación entre dos señales EEG como una función de tiempo. Para esto, se considera tanto la relación de fase como la polaridad entre las dos señales que se están analizando pero sin tomar en cuenta la amplitud de la misma. Como valor obtenido, la rEEG se define dentro de los límites de -1 a +1, donde -1 significa correlación máxima negativa; 1, correlación máxima positiva y 0, ausencia de correlación. La interpretación de estos valores es en relación a la participación sincronizada de dos áreas corticales diferentes (Guevara et al., 2015).

Actividad EEG y Procesos Cognitivos

Por sus características, la técnica electroencefalográfica nos permite conocer cambios en la activación y conectividad cerebral durante diferentes estados (Decker et al., 2017; Guevara et al., 1997). En este sentido, dicha técnica se ha utilizado en neurociencias para describir la participación de diferentes estructuras cerebrales en los procesos cognitivos.

Por ejemplo, Schutte, Kenemans y Schutter (2017) utilizaron la técnica EEG durante un paradigma de toma de decisiones de bajo riesgo en donde, además, evaluaban la adaptación conductual a los cambios en las contingencias estímulo-resultado. En la tarea usada, los participantes elegían entre dos cantidades ficticias de dinero (una cantidad alta y otra baja). Así, en una primera condición, la cantidad alta era recompensada en 80 % de las veces y castigada el otro 20 %, es decir, ganaban o perdían la cantidad seleccionada, respectivamente. Posteriormente, las contingencias de la tarea cambiaban, dando paso a una condición inversa, en donde la cantidad alta era recompensada 20 % de las veces y castigada

un 80 %, por lo que los participantes tenían que adaptar su conducta a elegir las cantidades bajas, que eran las de menor riesgo. Los autores reportaron, como resultado de un análisis de correlación entre variables, que a mayor actividad theta y beta en áreas frontales, era menor la adaptación de los participantes a los cambios en la tarea; los participantes que presentaban mayor actividad de estas bandas seguían eligiendo las cantidades mayores a pesar de que recibían castigo en un 80 % de las veces.

Por otra parte, dos estudios (Tang et al., 2013; van Driel et al., 2012) han reportado el aumento de las frecuencias que comprenden las bandas theta y alfa en regiones prefrontales tanto derecha e izquierda durante el conflicto generado cuando hay cambios en el contexto de la tarea y se debe cambiar la respuesta asociada. Respecto a la banda theta, se ha asociado en varios trabajos con el mantenimiento y la manipulación de la información en la memoria de trabajo. Por ejemplo, en un estudio reportaron mayor conectividad prefronto-parietal en esta banda (theta) durante una tarea en la que a los participantes evaluados se les presentaban dos patrones de líneas con diferentes características (largo, ancho, número de líneas), mismo que tenía que mantener en la memoria durante 3 segundos. Después de este retraso, se les daba una característica, como podría ser largo, ancho o número, y como respuesta el participante tenía que indicar cuál de los dos estímulos presentados previamente encajaba mejor (Sauseng et al., 2005).

Utilizando la estimulación de corriente alterna transcraneal, activaron regiones prefrontales en el rango de frecuencias comprendido en la banda theta a un grupo de participantes mientras respondían una tarea de aprendizaje inverso con reforzador y castigo. Como resultado se observó una mejora en la adaptación a los cambios en la tarea, con una mayor rapidez de respuesta (Wischnewski et al., 2016).

Además, mediante la técnica EEG, se puede diferenciar el grado de activación y acoplamiento funcional de estructuras cerebrales en la temporalidad de algunas funciones ejecutivas. Por ejemplo, en un estudio se reportaron cambios en la potencia absoluta y en la correlación electroencefalográfica tanto en la fase 1 como en la fase 3 de la toma de decisiones en estructuras frontopolares. Con base en los resultados obtenidos, se podría sugerir que los cambios en la actividad eléctrica cerebral de estas dos fases tienen relación con el procesamiento de los estímulos presentados, previo a dar una respuesta, durante la toma de decisiones (Cortes et al., 2021).

De manera indirecta también se ha asociado la reactividad de las bandas con otros procesos cognitivos en ciertas estructuras cerebrales en específico. Por ejemplo, Boorman et al. (Boorman et al., 2009, 2011) reportaron la participación de la corteza frontopolar durante el monitoreo y el mantenimiento del curso de acción en una tarea de TD, procesos que han sido relacionados con la banda electroencefalográfica beta (Gola et al., 2013; Subramaniam et al., 2019).

Por otro lado, la corteza dorsolateral se ha asociado con la demanda atencional, específicamente cuando la atención se tiene que alternar entre diferentes estímulos (Kondo et al., 2004). La banda alfa es la banda electroencefalográfica más característica de dicho proceso, observándose una relación inversa entre la atención a los estímulos externos y la presencia de esta banda (Klimesch, 2012).

También la corteza dorsolateral participa durante la evaluación de la memoria de trabajo evaluada mediante una tarea visuoespacial donde los participantes tenían que retener elementos durante un periodo para después hacer uso de la información (Sauseng et al., 2005). Dicho proceso, el de mantener y manipular información en la memoria de trabajo, se ha relacionado con la banda theta en diferentes estudios, con prevalencia en áreas

dorsolaterales (Bartoli et al., 2018; Lehr et al., 2019). Sin embargo, durante este procesamiento atencional, la corteza dorsolateral no participa por si sola, sino que se ha reportado su participación en conjunto con la corteza parietal (Sauseng et al., 2005).

Los estudios anteriores dan evidencia de la participación de la corteza frontopolar y dorsolateral, en conjunto con la corteza parietal, durante diversos procesos implicados en la adaptación conductual durante diferentes paradigmas, por lo que dichas estructuras podrían estar participando durante la TD en una condición de aprendizaje inverso.

Estado de la Cuestión

El aprendizaje y la flexibilidad cognitiva son algunos de los procesos implicados en la toma de decisiones. Uno de los paradigmas que se usan para estudiar estos procesos es el de aprendizaje inverso, mediante el cual diferentes estudios han puesto de manifiesto la participación de la corteza prefrontal.

Si bien, se ha reportado que las áreas orbitofrontal y ventromedial de la corteza prefrontal participan en la flexibilidad cognitiva, durante el aprendizaje inverso, en la codificación del valor del estímulo, así como para la inhibición de la respuesta preponderante, a la fecha aún no se ha determinado la participación de otras subregiones específicas de la corteza prefrontal, tales como las áreas dorsolateral y frontopolar. La participación del área dorsolateral en este proceso es controvertida, hay trabajos que mencionan una relación entre la funcionalidad de esta estructura cortical y el aprendizaje inverso, sin embargo, hay estudios que refieren no haber encontrado dicha asociación, llegando a una discrepancia en los reportes experimentales. Aún en los estudios que sí refieren su participación durante el proceso, están los que la relacionan con el proceso de retroalimentación, mientras que otros

hablan de su participación en el conflicto de la elección de las opciones. En el caso de la corteza frontopolar, se conoce poco sobre su actividad ante dicho paradigma. En general, estas dos subregiones prefrontales han sido asociadas a diferentes procesos cognitivos implicados en la toma de decisiones, tales como la evaluación de diferentes tipos de información en la memoria de trabajo; la corteza frontopolar en la manipulación de la información generada internamente y la dorsolateral en la manipulación de la información externa. En las tareas de toma de decisiones generalmente debe realizarse una primera asociación de estímulos con un valor asignado de manera que los participantes puedan elegir una propuesta dada. Si después de ese aprendizaje inicial se cambia el valor asignado a cada estímulo, el participante deberá reaprender, es decir, detectar el cambio de asociación para realizar la actualización del aprendizaje (consolidar la nueva asociación entre los estímulos y sus valores). Parte de la literatura sobre el aprendizaje inverso refiere que para que se logre la adaptación conductual a los cambios en el contexto se requiere de la actualización de la información en la memoria de trabajo. Es por estas demandas cognitivas que las cortezas frontopolar y dorsolateral podrían estar participando durante tareas de aprendizaje inverso, en la detección del cambio de estrategias y en la implementación de nuevas conductas y habilidades requeridas durante la toma de decisiones.

Con base en lo anterior, es que en el presente estudio se tiene como finalidad determinar el grado de correlación electroencefalográfica, entre las cortezas prefrontales (área frontopolar y área dorsolateral) y parietales durante el aprendizaje inverso en una tarea de toma de decisiones en hombres jóvenes.

Planteamiento del Problema

La toma de decisiones se ha dividido en tres fases temporal y funcionalmente distintas, las cuales se asocian con una actividad eléctrica cortical característica. La adecuada asociación de los estímulos durante las fases de formación de preferencias (fase 1) y de evaluación del resultado (fase 3) permite la constante actualización y corrección de la conducta con el fin de lograr la meta en curso. Uno de los procesos que permiten esta actualización, y adaptación conductual en la toma de decisiones, es la flexibilidad cognitiva.

La flexibilidad cognitiva es un proceso relevante para poder ejecutar tareas de aprendizaje inverso, en el cual se ha sugerido participan diversas áreas corticales, especialmente las áreas orbitofrontal y ventromedial. Sin embargo, a la fecha aún no se ha determinado la participación de otras subregiones específicas de la corteza prefrontal durante la actualización de la información en la relación estímulo-resultado, tales como el área dorsolateral y la frontopolar y su relación con la corteza parietal, las cuales son importantes en procesos como la evaluación de diferentes tipos de información en la memoria de trabajo y, por ende, en la toma de decisiones.

Entender la interacción entre el funcionamiento cortical durante las fases 1 y 3 de la toma de decisiones y el aprendizaje inverso contribuirá a esclarecer los mecanismos neurales que permiten la adaptación conductual en la toma de decisiones. Por lo tanto, el presente trabajo pretende determinar el grado de acoplamiento funcional entre las cortezas prefrontales y parietales, asociado al aprendizaje inverso, durante las fases 1 y 3 de la toma de decisiones en hombres jóvenes.

Objetivos

Objetivo General

Determinar la funcionalidad cortical de las cortezas prefrontales y parietales durante el aprendizaje inverso en las fases 1 y 3, así como su relación con parámetros conductuales, de la TD en hombres jóvenes.

Objetivos Específicos

- Comparar los resultados conductuales entre las condiciones de aprendizaje inicial y de aprendizaje inverso.
- Caracterizar la potencia absoluta y la rEEG intrahemisférica de las áreas prefrontales y parietales durante la fase 1 de la toma de decisiones en la condición de aprendizaje inverso y de aprendizaje inicial.
- Caracterizar la potencia absoluta y la rEEG intrahemisférica de las áreas prefrontales y parietales durante la fase 3 de la toma de decisiones en la condición de aprendizaje inverso y de aprendizaje inicial.
- Comparar la correlación entre la actividad EEG de las áreas prefrontales y parietales y el desempeño conductual de la toma de decisiones en la condición de aprendizaje inicial y de aprendizaje inverso.

Hipótesis

Hipótesis General

El aprendizaje inverso afectará la funcionalidad cortical prefrontal y parietal en las fases 1 y 3, así como los parámetros conductuales, de la toma de decisiones.

Hipótesis Específicas

En la condición de aprendizaje inverso:

- Habrá un menor puntaje respecto a la condición de aprendizaje inicial.
- Habrá un menor tiempo de reacción respecto a la condición de aprendizaje inicial.
- Habrá mayor potencia absoluta de las bandas theta y alfa en la corteza dorsolateral durante la fase de formación de preferencias (fase 1) respecto a la condición de aprendizaje inicial.
- Habrá mayor correlación intrahemisférica frontopolar-dorsolateral de la banda theta durante la fase de formación de preferencias (fase 1) respecto a la condición de aprendizaje inicial.
- Habrá mayor correlación intrahemisférica prefronto-parietal de la banda theta durante la fase de formación de preferencias (fase 1) respecto a la condición de aprendizaje inicial.
- Habrá una mayor potencia absoluta de las bandas beta y gamma en la corteza frontopolar durante la fase de evaluación del resultado (fase 3) respecto a la condición de aprendizaje inicial.

- Habrá mayor relación entre la actividad EEG prefronto-parietal y los datos conductuales respecto a la condición de aprendizaje inicial.

Método

Se registraron 22 hombres con una edad comprendida entre los 18 y los 35 años los cuales fueron contactados mediante redes sociales y universidades. Una vez aceptada la invitación a participar de manera voluntaria, se agendó para una sesión de registro por participante con una duración aproximada de dos horas en el laboratorio de Correlación Electroencefalográfica y Conducta del Instituto de Neurociencias de la Universidad de Guadalajara.

Una vez en el laboratorio, el participante debía leer y, en caso de estar de acuerdo, firmar el consentimiento informado. Además de que tenía que cumplir con todos los criterios de inclusión descritos a continuación:

Criterios de Inclusión

- Hombres de entre 18 y 35 años
- Lateralidad diestra
- Licenciatura iniciada, como escolaridad mínima
- Sin antecedentes de patologías neurológicas, psiquiátricas o enfermedades crónicas
- Sin tratamiento médico actual
- CI mayor a 85, medido por las pruebas de cubos y vocabulario del WAIS IV (Wechsler, 2014)
- Con puntuación normalizada mínima de 7 en atención y concentración, medidos mediante la batería (NEUROPSI) (Ostrosky-Solís et al., 2013)

Escalas y Pruebas

- Carta de consentimiento informado
- Entrevista de datos generales
- Inventario de lateralidad de Edimburgo
- Área de atención y concentración de la batería NEUROPSI: Son cinco subpruebas las correspondientes a esta área (cubos en progresión, retención de dígitos, detección visual, series sucesivas y detección de dígitos). El evaluar los procesos que conforman esta área tiene como objetivo determinar la capacidad de enfocar y sostener la atención, previo a evaluar otros procesos cognitivos que requieran de la atención (Ostrosky-Solís et al., 2013). Como criterio de inclusión es útil para delimitar una muestra de participantes con valores normales en estas escalas para que la ejecución de la tarea de TD no se vea afectada por la atención. En la subprueba de **retención de dígitos**, el evaluador comienza leyendo una serie de números para, posteriormente, ser repetidos por el participante en el mismo orden. La complejidad, dada por el incremento de los números a repetir, aumenta conforme el participante completa correctamente una serie; en **cubos en progresión**, es señalada una serie de cubos, de nueve posibles, que están acomodados de manera preestablecida, posteriormente, se le pide al examinado que los señalarle en el mismo orden. De manera similar a la prueba anterior, la complejidad va aumentando conforme el participante completa exitosamente cada serie; para **detección visual**, se entrega una hoja con columnas y filas de compuestas de diferentes figuras, ya con la hoja en su posesión, se le da la instrucción de encerrar en un círculo las estrellas de 5 picos (similares a una muestra

señalada por el evaluador al inicio) encuentre en un minuto cronometrado; en **detección de dígitos**, el examinador le lee al evaluado una lista de números en volumen y velocidad constante, donde este último tiene que dar un golpe en la mesa cada vez que escuche un 5 seguido de un 2; para **series sucesivas**, se le solicita al evaluado que cuente de tres en tres comenzando desde el uno y que se detenga hasta llegar al número cuarenta. Se le da el ejemplo de “uno, cuatro, continúe hasta llegar al cuarenta”.

- Versión corta de la batería WAIS-IV: Para hacer eficiente el tiempo en el cálculo del cociente intelectual (C.I.) estimado se aplicó esta versión abreviada del WAIS-IV que consta de las subpruebas de diseño con cubos y vocabulario. La subprueba de **diseño con cubos** está conformada por 9 cubos iguales (tiene dos caras blancas, otras dos caras rojas, y dos caras con la mitad roja y la mitad blanca), así como por una libreta de estímulos, para el evaluado, formada por 14 diseños que aparecen de menor dificultad a mayor. Por orden de dificultad, se le van presentando al participante los diferentes diseños presentados por el examinador. El objetivo del participante es utilizar los cubos para copiar el diseño presentado. Con base a la dificultad de los ensayos, primero se le dan al participante dos cubos para los primeros dos diseños, cuatro para los próximos ocho diseños, y los nueve cubos en total para los últimos y de mayor dificultad. Para la calificación se evalúa tanto la similitud de cada uno de los diseños como el tiempo utilizado por cada ejercicio de los 14 totales. La máxima puntuación natural posible en esta subprueba es de 66 puntos. Respecto a la segunda subprueba, la de **vocabulario**, está formada por 30 palabras que también se encuentran en la libreta de estímulos. Estas palabras, también con aumento de dificultad conforme avanzan las palabras, se le leen al evaluado en voz alta y se le

presentan y señalan en la libreta de estímulos como ayuda complemento visual. Ante cada estímulo, el examinado tiene que verbalizar la definición de cada palabra mientras que el examinador va registrando y calificando la respuesta. La calificación de cada palabra consta de asignar valores de 0, 1 ó 2 con base a definición brindada por el evaluado. El reactivo inicial de la tarea es el 5, pero si la puntuación obtenida por el participante es de 0 ó 1 en los reactivos 5 ó 6, es necesario aplicar los reactivos anteriores. La máxima puntuación natural posible en esta subprueba es de 57. Una vez que tienen las calificaciones de ambas subpruebas, se realiza la suma de las puntuaciones escalares y, con el resultado, se obtiene un estimado del C.I. (Ver Tabla 1) (Denney et al., 2015).

Tabla 1. Puntuaciones escalares.

Suma de puntuaciones escalares	C. I. estimado	Suma de puntuaciones escalares	C. I. estimado
2	45	21	98
3	48	22	100
4	51	23	103
5	54	24	106
6	56	25	109
7	59	26	111
8	62	27	114
9	65	28	117
10	67	29	120
11	70	30	122
12	73	31	125
13	76	32	128

14	78	33	131
15	81	34	133
16	84	35	136
17	87	36	139
18	89	37	142
19	92	38	144
20	95		

Nota. Relación de la suma de las puntuaciones escalares obtenidas en las subpruebas de diseño con cubos y vocabulario del WAIS-IV (Denney et al., 2015).

Tarea de Toma de Decisiones

La tarea base de TD fue diseñada en el laboratorio con el objetivo de separar cada fase propuesta por Ernst y Paulus (2005): 1) evaluación y formación de preferencias entre posibles opciones; 2) selección y ejecución de una acción; y, 3) evaluación del resultado (Cortes et al., 2021).

La tarea estuvo conformada por un banco de seis figuras neutras, cada una con un valor preestablecido del 0 al 10 aumentando de dos en dos (Figura 4).

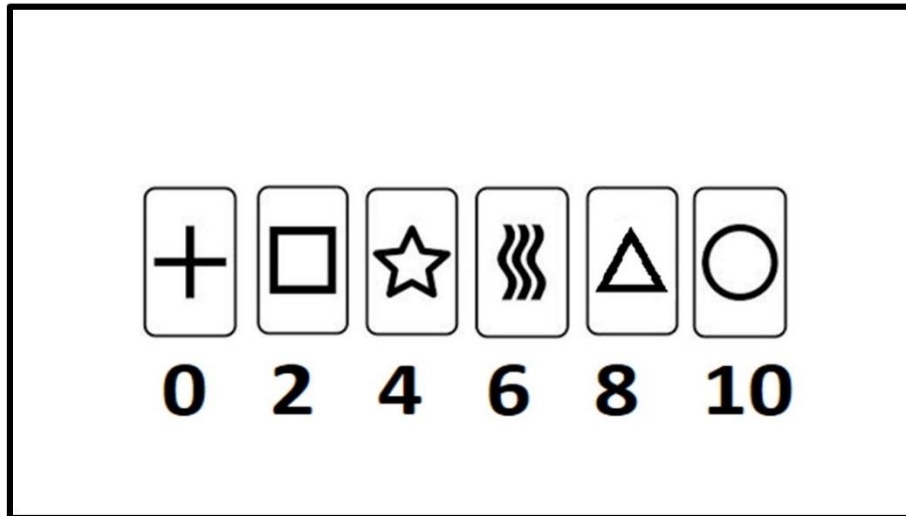


Figura 4. Banco de 6 figuras neutras y un ejemplo de valor preasignado.

De este banco se realizaron 120 combinaciones de 3 figuras cada una, el total de combinaciones se dividió en bloques de 40. Además, cada una de estas combinaciones estuvo acompañada por una de 4 posibles instrucciones, las cuales fueron semi-aleatorizadas por bloques. En conjunto, la combinación de figuras y la instrucción, formó cada uno de los ensayos.

Así, al inicio del ensayo se presentaba una de las combinaciones de tres figuras en una pantalla con una duración de 4 segundos durante los cuales se registró la actividad EEG. Esto correspondiente a la fase de formación de preferencias (fase 1) de la toma de decisiones.

Pasados los 4 segundos, aparecía una instrucción en la parte inferior central de la pantalla. Las instrucciones posibles eran:

- Elige una imagen para conservar
- Elige dos imágenes para conservar
- Elige una imagen para eliminar

- Elige dos imágenes para eliminar

Las instrucciones fueron semi-aleatorizadas.

Una vez con la instrucción en pantalla, el participante tenía que acatarla seleccionando figuras para eliminar o conservar con el objetivo de obtener el mayor puntaje posible. Esto correspondiente a la fase de selección y ejecución de una acción (fase 2) de la toma de decisiones y su duración comenzó desde la aparición de la instrucción hasta que el participante realizó la selección, medida que fue considerada como tiempo de reacción.

Posteriormente, y correspondiente a la fase de evaluación del resultado (fase 3) de la toma de decisiones, se mostró una nueva pantalla en donde se observaba el puntaje obtenido, en el centro de la pantalla, correspondiente a la selección realizada, así como el puntaje acumulado, a lo largo de la tarea, en la esquina superior derecha. En la instrucción de elegir, los puntos obtenidos equivalen a la suma de las figuras seleccionadas; en cambio en la instrucción de eliminar, los puntos corresponden a la suma de las figuras no seleccionadas. La duración de esta pantalla también fue de 4 segundos, pasado este tiempo, aparecía de nuevo una pantalla correspondiente a la fase 1 de la TD, pero con una nueva combinación, iniciando un nuevo ensayo. Esta secuencia continuó hasta terminar la tarea (40 ensayos) (Figura 5).

Se aplicaron 3 bloques de la tarea previamente descrita, cada uno constituido de 40 ensayos. El primer bloque de 40 ensayos correspondía a la condición de *aprendizaje inicial*, con el objetivo de que el participante asociara, mediante ensayo y error, el valor de cada estímulo. Los siguientes 40 ensayos, en donde los valores de las figuras se mantuvieron igual que en el bloque anterior, tuvo el objetivo de que se reforzara la asociación de los estímulos

con su valor. El tercer y último bloque de ensayos correspondió a la condición de *aprendizaje inverso*, donde los participantes ejecutaron la tarea con un reajuste en los valores de las figuras; cada estímulo tuvo un valor diferente al que se tuvo en los 80 ensayos (40 y 40) anteriores. Con el objetivo de evaluar la adaptación de los participantes a los cambios contextuales de la tarea, solo se consideró la actividad electroencefalográfica de los primeros 15 ensayos de cada condición experimental.

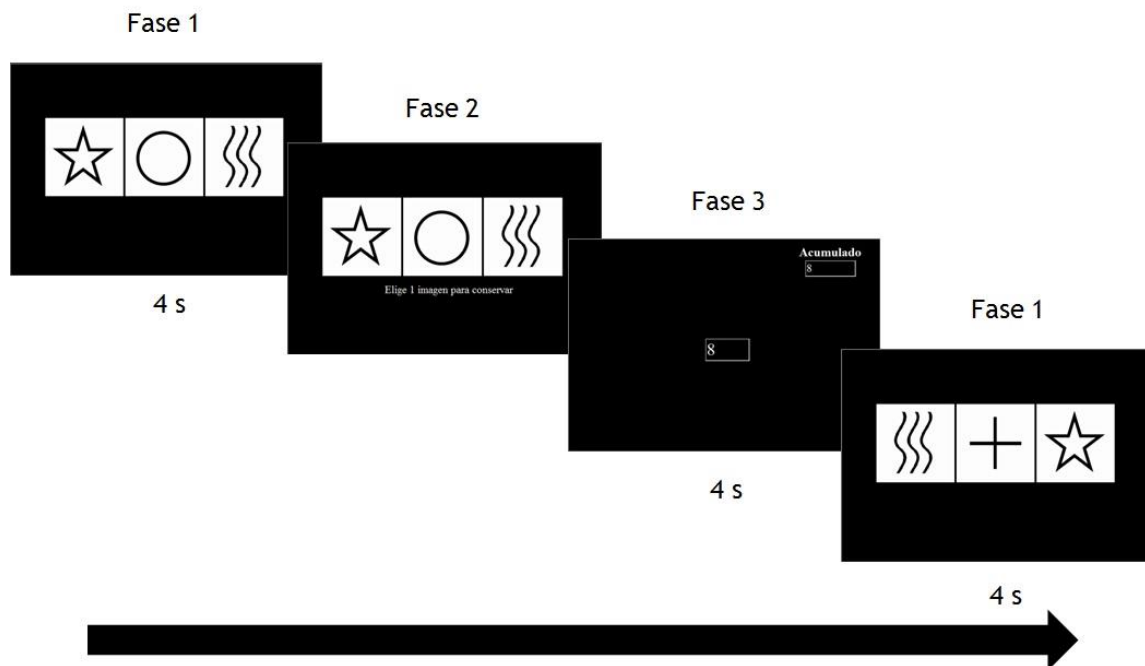


Figura 5. Secuencia de aparición de las pantallas por ensayo, cada pantalla equivale a una de las fases de la toma de decisiones propuestas por Ernst y Paulus (2005).

Registro EEG

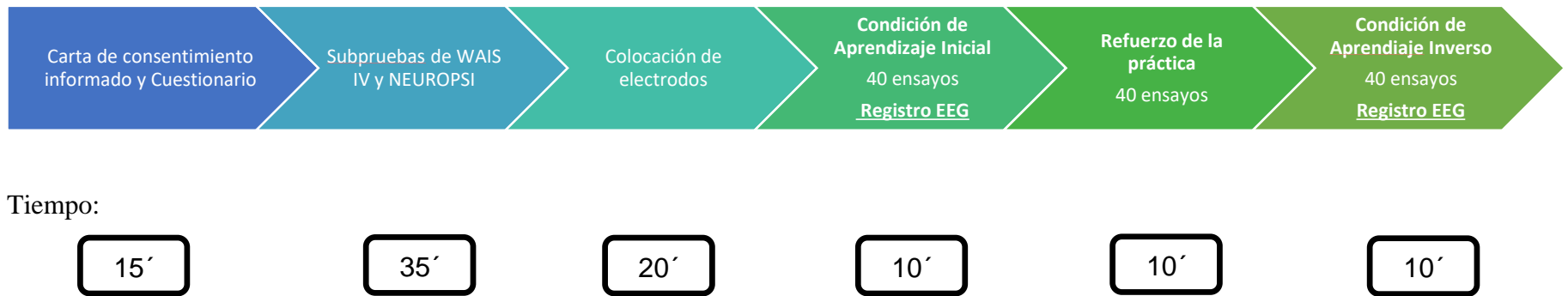
El equipo utilizado para registrar la señal EEG cortical fue un polígrafo Natus del modelo Nic One. Con el fin de registrar las áreas frontopolares, dorsolaterales y parietales de la corteza cerebral, se colocaron electrodos siguiendo el Sistema Internacional 10-20 (Jasper, 1958) en las derivaciones Fp1, Fp2 (correspondientes a la corteza frontopolar); F3 y F4 (correspondientes a la corteza dorsolateral); y P3 y P4 (correspondientes a la corteza parietal) (Homan, 1988; Okamoto et al., 2004; Rossi et al., 2001). Se registraron las bandas de frecuencias comprendidas entre 1 y 50 Hz, además de aplicar el filtro de notch para frecuencias de 60 Hz y la frecuencia de muestreo fue de 500 Hz. También se colocaron electrodos en el canto superior izquierdo e inferior derecho para el registro del oculograma con el objetivo de tener mayor control de los movimientos oculares, así como un electrodo en la muñeca izquierda para el registro de la frecuencia cardíaca como una medida periférica. La señal electroencefalográfica obtenida de los registros fue revisada fuera de línea en el programa CHECAsEN (Guevara et al., 2010) con el fin de eliminar segmentos con artefactos. Una vez que se tenían los segmentos libres de artefactos se realizó el tratamiento de la señal y análisis de la misma en el programa EEGbands2 (Guevara et al., 2014).

Los electrodos que se utilizaron para registrar la actividad EEG fueron de la marca Grass de tipo platillo con cubierta de chapa de oro. La impedancia de cada uno fue menor de 10 k Ω .

Análisis Estadístico

Para el registro EEG, se revisaron los segmentos de señal para eliminar aquellos con ruido ocasionado por artefactos. La señal fue separada en dos bloques (condiciones), correspondiente a la fase 1 y a la fase 3 de la toma de decisiones. De cada condición (aprendizaje inicial y aprendizaje inverso) se analizó la señal electroencefalográfica correspondiente a los primeros 15 ensayos. Se analizaron las bandas de frecuencias: delta (1.0-3.5 Hz), theta (4.0-7.5 Hz), alfa1 (8.0-10.5 Hz), alfa2 (11.0-13.5 Hz), beta1 (14.0-19.5 Hz), beta2 (20.0-30.0 Hz) y gamma (31.0-50.0 Hz). El diseño propuesto es de dos factores, donde el factor A son las condiciones de aprendizaje inicial y de aprendizaje inverso y, el factor B las fases 1 y 3 de la TD (2x2) (diseño de bloques completos aleatorizados, de dos factores). Se aplicó un ANOVA de 2 factores para el análisis estadístico de los datos electroencefalográficos; una t de Student de grupos correlacionados para la comparación de los datos conductuales entre condiciones y la correlación de Pearson seguida de una comparación de Fisher para la comparación de la relación entre los datos electroencefalográficos y los conductuales.

Diagrama Experimental



Variables

Independientes

- Tarea de TD de:
 - Aprendizaje Inicial
 - Aprendizaje Inverso
- Fases de la TD
 - Fase 1: Formación de preferencias
 - Fase 3: Evaluación del resultado

Dependientes

- EEG
 - Potencia absoluta (Fp1, Fp2, F3, F4, P3 y P4).
 - Correlación intrahemisférica prefrontal (Fp1-F3; Fp2-F4)
 - Correlación intrahemisférica prefronto-parietal (F3-P3; F4-P4)
- Conductuales
 - Tiempo de reacción
 - Puntaje relativo
- Correlacionales
 - Puntaje relativo y actividad EEG prefronto-parietal
 - Tiempo de reacción y actividad EEG prefronto-parietal

Recursos

Para la realización del proyecto se requirió del equipo de registro y amplificación de señal electroencefalográfica perteneciente al laboratorio de Correlación Electroencefalográfica y Conducta, así como de consumibles para la adecuada colocación de electrodos. Como recurso humano, el laboratorio contó con la asesoría del investigador responsable del laboratorio, así como de alumnos capacitados para la etapa experimental.

Consideraciones Éticas

Para la realización de este proyecto colaboraron de manera voluntaria hombres mayores de edad, quienes dieron su consentimiento por escrito para participar voluntariamente en el estudio, pudiendo abandonar el mismo en cualquier momento si así lo deseaba. A todos los participantes se les informó que los datos recabados en este proyecto se conservarían de manera anónima y serían de uso exclusivo del laboratorio. Los resultados obtenidos en las pruebas individuales para estimar el CI, así como de las subescalas del NEUROPSI podrían ser informados a los participantes sólo en caso de que los mismos lo soliciten de manera particular, haciéndoles mención de que se obtienen con fines de reportar características generales de la muestra y, por lo tanto, no tienen un valor diagnóstico.

Todos los procedimientos realizados en la presente investigación, al ser no invasivos, no pusieron en riesgo la integridad física, emocional o moral de los participantes, por lo tanto, corresponde a una “investigación con riesgo mínimo” de acuerdo con el artículo 17 del Reglamento de la Ley General de Salud en Materia de Investigación para la Salud. En todo el experimento, se siguieron los lineamientos especificados en las normas del Comité de Ética del Instituto de Neurociencias y los criterios de la Declaración de Helsinki de 1975 y sus enmiendas, así como los códigos y normas internacionales vigentes para las buenas prácticas en la investigación con humanos, y la Norma Oficial Mexicana NOM-012-SSA3-2012, que establece los criterios para la ejecución de proyectos de investigación para la salud en seres humanos.

Resultados

La muestra está conformada por 22 hombres con una edad comprendida entre los 18 y los 31 años. Como se observa en la Tabla 2, todos los participantes cumplieron con los criterios de inclusión.

Tabla 2. Características de los participantes.

n=22	Media	Desviación Estándar	Rango
Edad (años)	23.36	3.72	18-31
C.I.	104.63	9.01	92-128
Retención de dígitos en progresión	9.90	3.10	7-19
Cubos en progresión	10.90	2.34	8-14
Detección visual	12.00	2.02	7-15
Detección de dígitos	11.50	1.10	9-12
Series sucesivas	11.13	2.43	8-13

Nota. Promedio y desviación estándar de las diversas características medidas en los participantes (n=22). La edad está en años y los datos de las 5 subpruebas del NEUROPSI (últimas 5 filas) están en puntuación normalizada.

Resultados Conductuales

Puntaje Relativo

Para comparar los puntajes a lo largo de la tarea, el puntaje obtenido por ensayo se convirtió en puntaje relativo (0-100); independientemente de la combinación de estímulos, el puntaje se encontraba entre esos valores. Así, de cada combinación de tres estímulos, la elección de la o las figuras con mayor valor equivale a 100, la o las de menor valor a 0 y la elección intermedia a un valor entre 0 y 100. En la Figura 6 se observan las comparaciones entre condiciones por ensayo, mientras que en la Figura 7 están por puntaje acumulado en los 40 ensayos [$t(21) = -2.26$, $p(t) = 0.035$, d de Cohen = 0.650].

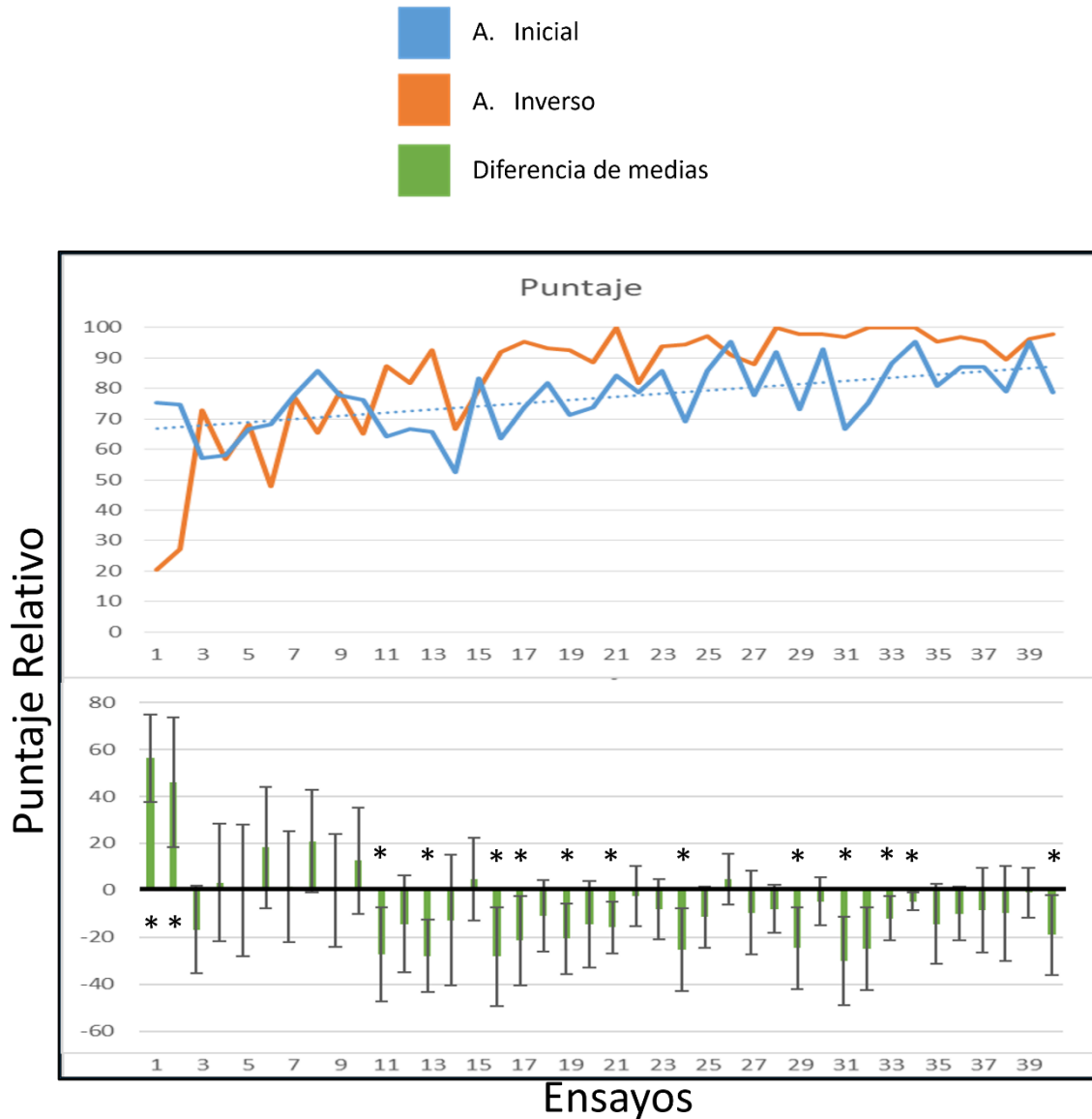


Figura 6. Puntajes relativos de los 40 ensayos de las condiciones de aprendizaje inicial (línea azul) e inverso (línea naranja). En el eje de las Y se encuentra el puntaje de 0 a 100 y en el de las X los ensayos del uno al cuarenta. En la gráfica superior se encuentran las medias de ambas condiciones de los 40 ensayos; en la inferior, las barras verdes indican la diferencia de medias (inicial-inverso) de cada ensayo con su respectivo error estándar, * $p \leq 0.05$

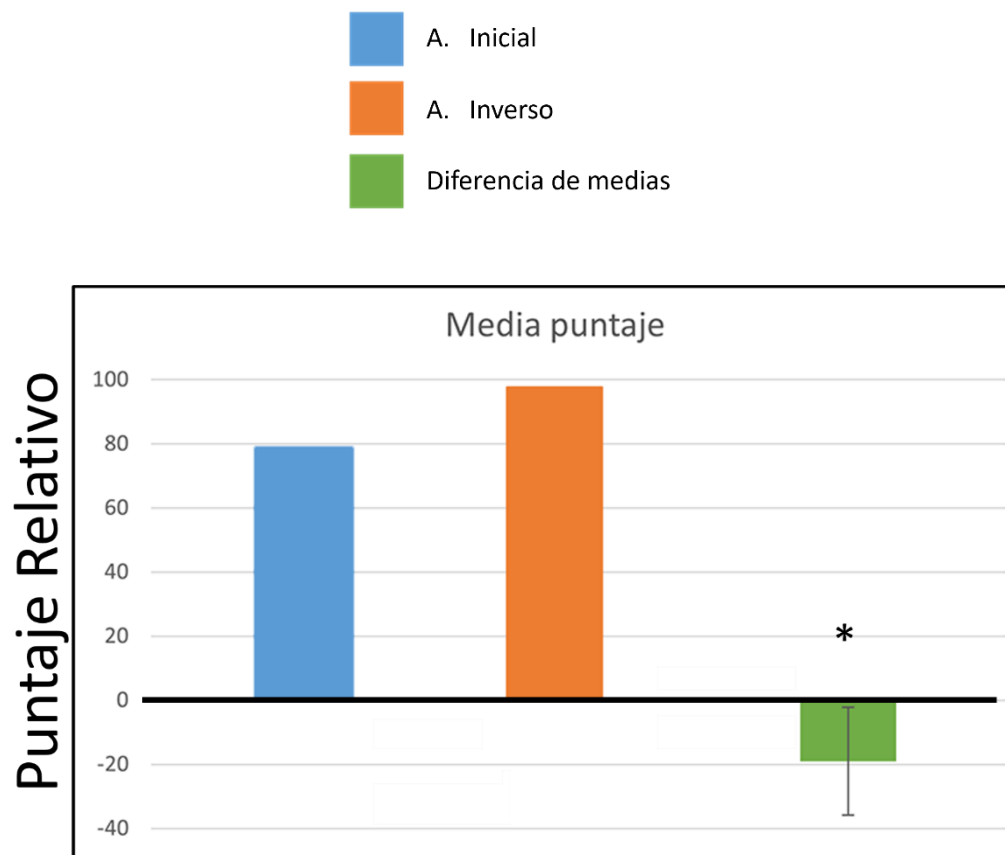


Figura 7. Media del puntaje relativo en ambas condiciones. En azul, la media del puntaje relativo durante la condición de aprendizaje inicial; en naranja, del aprendizaje inverso y en verde, la diferencia de medias (inicial-inverso) con su respectivo error estándar, * $p \leq 0.05$

Tiempo de Reacción

En la Figura 8 se muestran los promedios de los tiempos de reacción de la condición de aprendizaje inicial y de la de aprendizaje inverso. En la Figura 9 se observan la comparación entre condiciones de las medias del tiempo de reacción promedio (de los 40 ensayos).

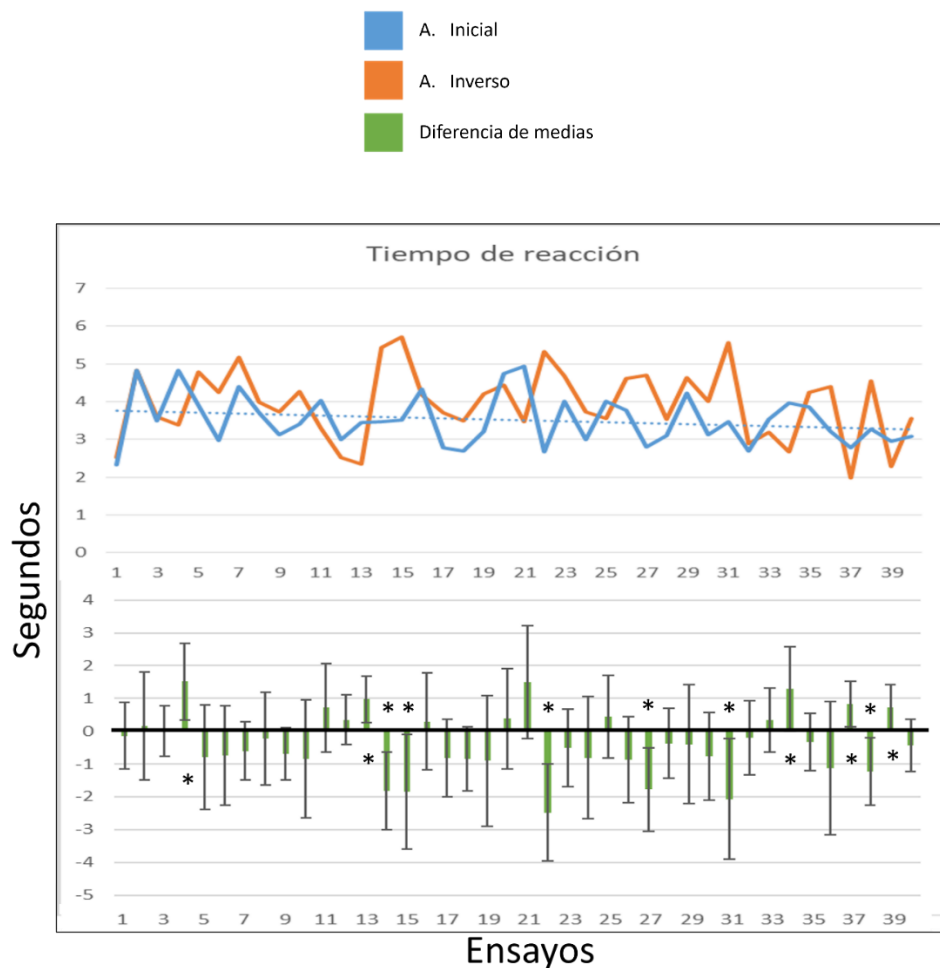


Figura 8. Tiempo de reacción de los 40 ensayos de las condiciones de aprendizaje inicial (línea azul) e inverso (línea naranja). En el eje de las Y se encuentra el tiempo en segundos y en el de las X los ensayos del uno al cuarenta. En la gráfica superior se encuentran las medias de ambas condiciones de los 40 ensayos; en la inferior, las barras verdes indican la diferencia de medias (inicial-inverso) de cada ensayo con su respectivo error estándar, * $p \leq 0.05$

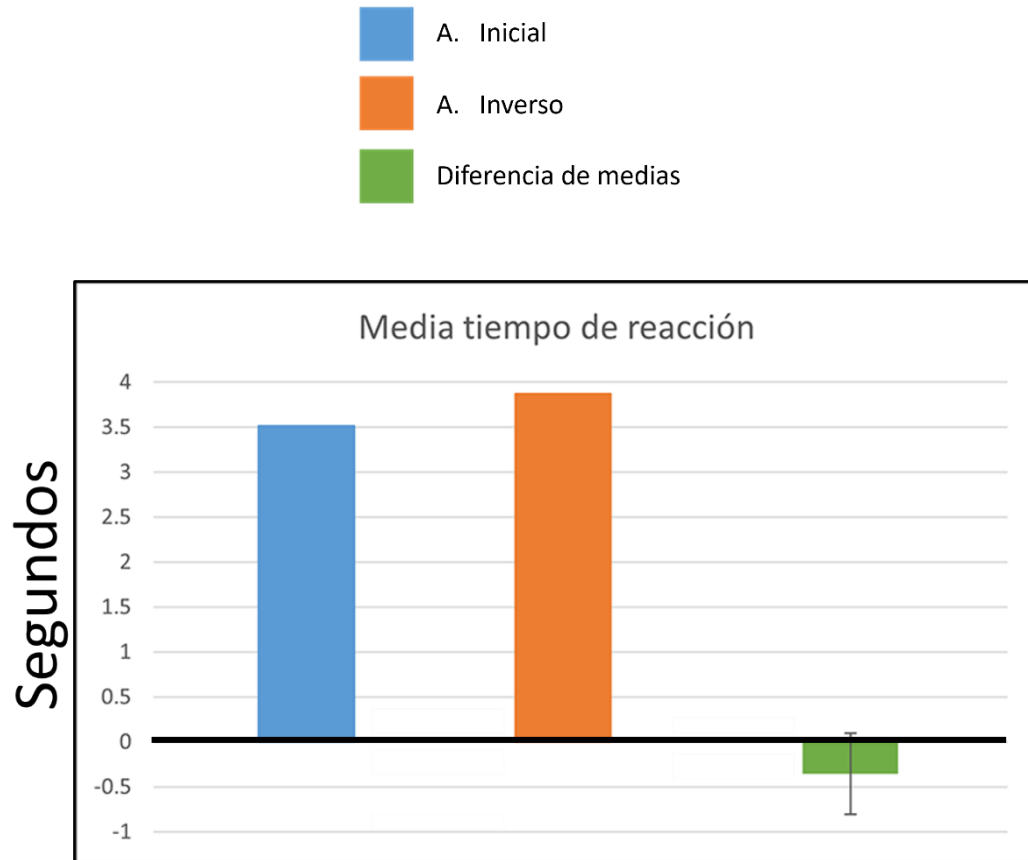


Figura 9. Media del tiempo de reacción en ambas condiciones. En azul, la media del tiempo de reacción de los 40 ensayos durante la condición de aprendizaje inicial; en naranja, del aprendizaje inverso y en verde, la diferencia de medias (inicial-inverso) con su respectivo error estándar, $*p \leq 0.05$

Resultados Electroencefalográficos

Con el objetivo de realizar un análisis más dirigido, como se mencionó previamente, se comparó solamente la actividad electroencefalográfica registrada durante los primeros 15 ensayos de cada condición, tanto para potencia absoluta como para Correlación Electroencefalográfica. Así, los resultados mostrados a continuación pertenecen a la comparación de estos ensayos iniciales.

Potencia Absoluta (PA)

Como resultado del análisis ANOVA se encontró interacción entre los factores A (condiciones: aprendizaje inicial y aprendizaje inverso) y B (fases de la toma de decisiones: fase 1 y fase 3) para la banda theta en la derivación dorsolateral izquierda (F3) [$F_{\text{Interacción}}(1,63) = 4.24$; $p(F) = 0.040$; $\eta^2 = 0.647$] (Figura 10).

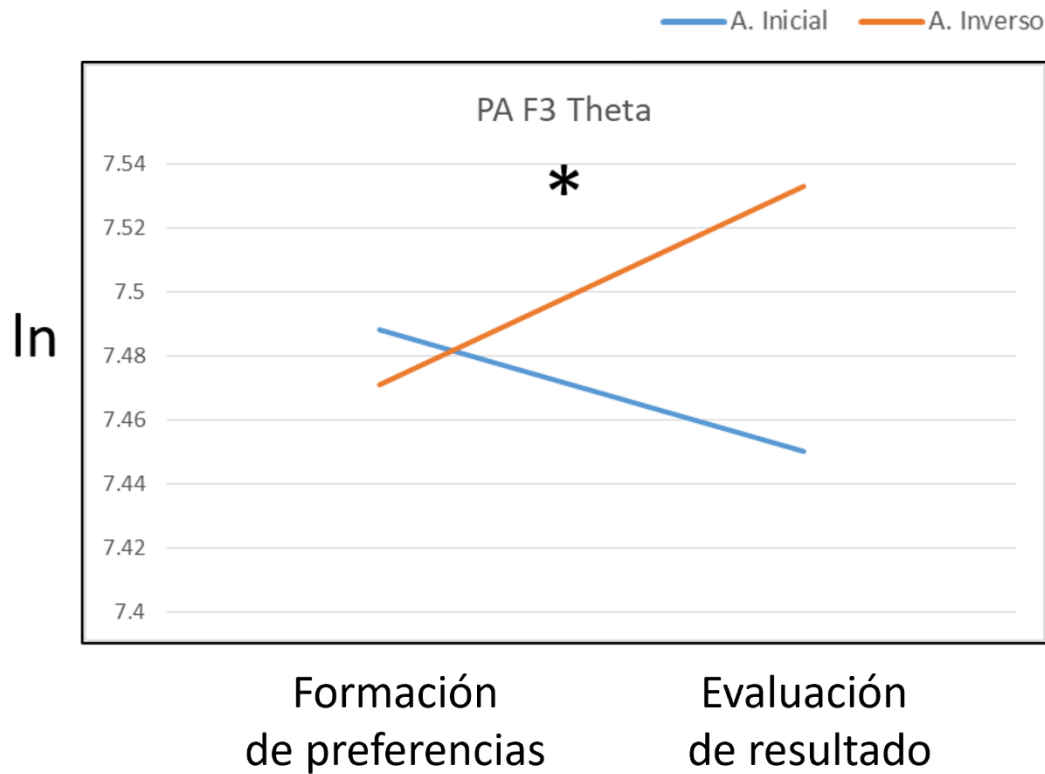


Figura 10. Media de la potencia absoluta en logaritmo natural de la corteza dorsolateral izquierda (F3) en la banda theta. La línea azul corresponde a la condición de aprendizaje inicial y la naranja a la condición de aprendizaje inverso. Los extremos izquierdos de cada línea corresponden a la fase 1 de la toma de decisiones; el extremo derecho corresponde a la fase 3, $*p \leq 0.05$

Correlación Interhemisférica

Como resultado del análisis ANOVA se encontró interacción entre los factores A y B para la banda alfa2 en las correlaciones entre las derivaciones parietal izquierda y derecha (P3-P4) [$F_{\text{Interacción}}(1,63) = 4.71$; $p(F) = 0.031$; $\eta^2 = 0.068$] (Figura 11).

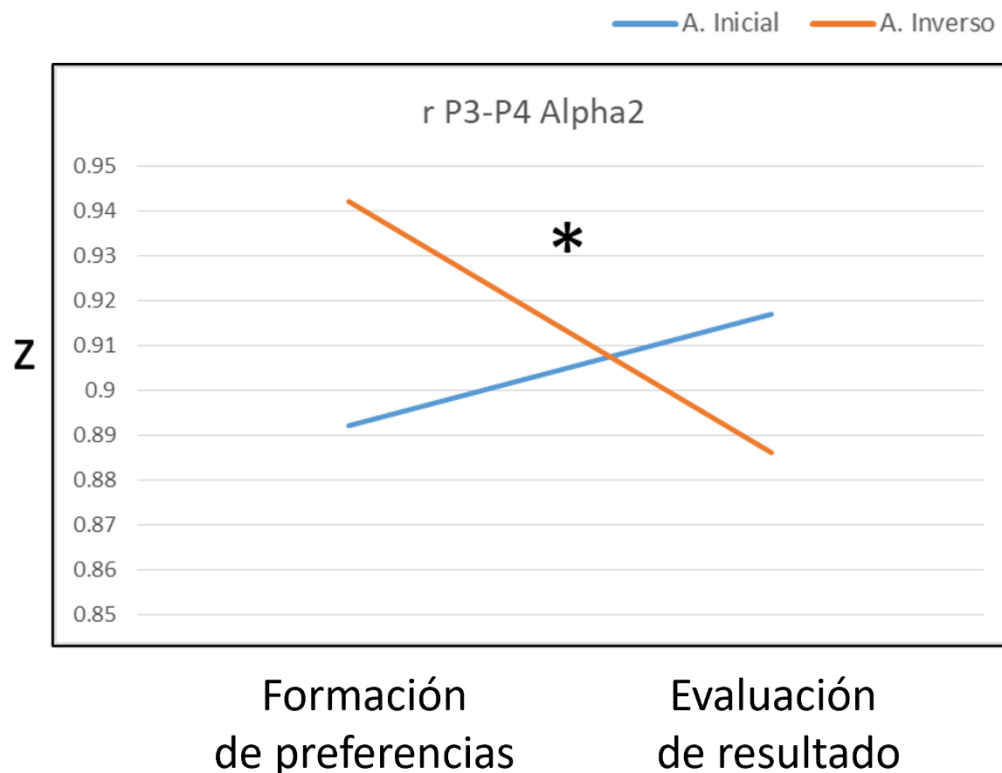


Figura 11. Media de la correlación interhemisférica en valores Z de las cortezas parietal izquierda y derecha (P3-P4) en la banda alfa2. La línea azul corresponde a la condición de aprendizaje inicial y la naranja a la condición de aprendizaje inverso. El extremo izquierdo de cada línea corresponde a la fase 1 de la toma de decisiones; el extremo derecho corresponde a la fase 3, $*p \leq 0.05$

Correlación Intrahemisférica

Como resultado del análisis ANOVA se encontró interacción entre los factores A y B para la banda alfa1 en la correlación entre las derivaciones frontopolar y dorsolateral derechas (Fp2-F4) [$F_{\text{Interacción}} (1,63) = 5.70$; $p (F) = 0.018$; $\eta^2 = 0.083$] (Figura 12).

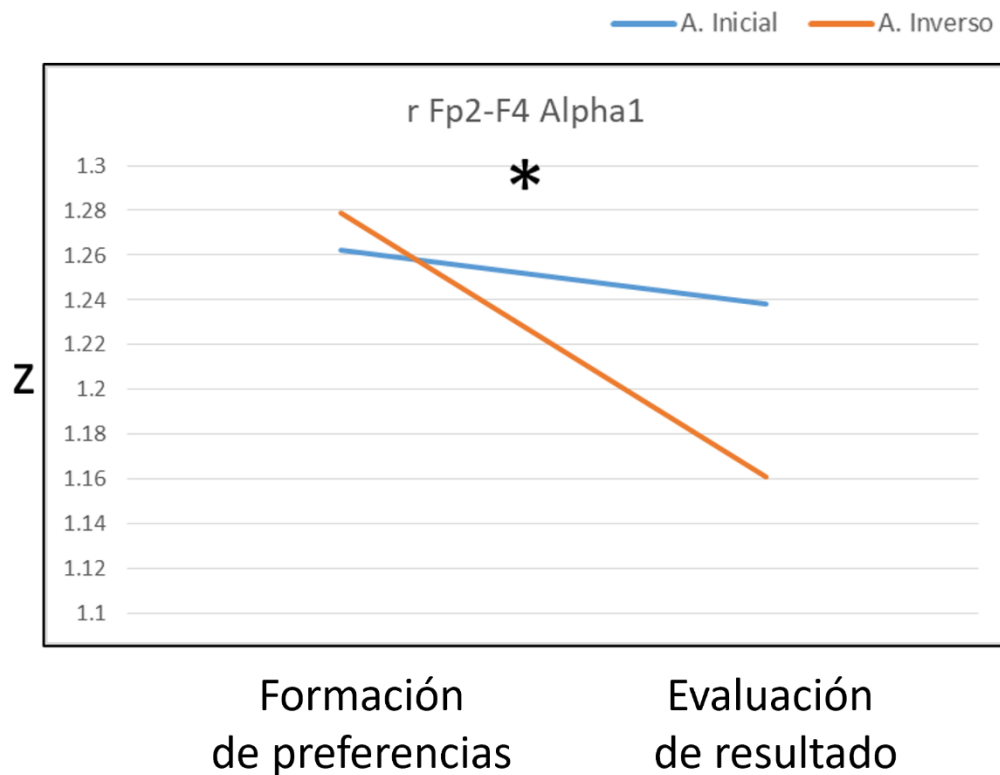


Figura 12. Media de la correlación interhemisférica en valores z de las cortezas frontopolar y dorsolateral derechas (Fp2-F4) de la banda alfa1. La línea azul corresponde a la condición de aprendizaje inicial y la naranja a la condición de aprendizaje inverso. El extremo izquierdo de cada línea corresponde a la fase 1 de la toma de decisiones; el extremo derecho corresponde a la fase 3, $*p \leq 0.05$

Resultados Correlacionales

Para describir la relación entre el desempeño conductual (puntaje y tiempo de reacción) y la actividad EEG de la condición de aprendizaje inicial y la de aprendizaje inverso se utilizó la correlación de Pearson. Para comparar las correlaciones de ambas condiciones se utilizó la comparación de Fisher.

En este sentido, durante la condición de aprendizaje inverso resultó una correlación negativa entre la potencia absoluta de la banda theta en la corteza dorsolateral derecha en la fase 1 como en la 3 y el puntaje acumulado, respecto a la condición de aprendizaje inicial (Figura 13). Es decir, que a menor puntaje acumulado durante la condición de aprendizaje inverso, mayor era la potencia absoluta de corteza registrada.

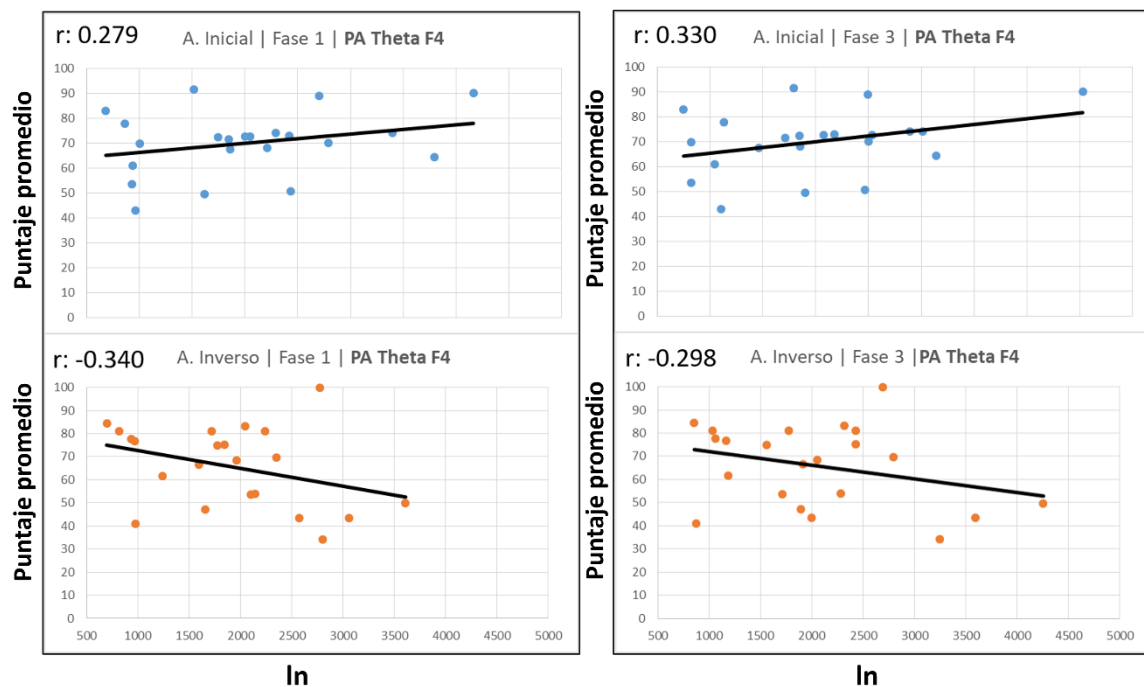


Figura 13. Comparación entre condiciones de las correlaciones entre puntaje acumulado y PA. Las imágenes de la izquierda muestra la dispersión del puntaje acumulado con la actividad de la banda Theta de la corteza dorsolateral derecha durante la fase 1 de la TD;

mientras que las imágenes de la derecha muestran la relación de estos mismos valores, pero durante la fase 3 de la TD.

De manera similar, durante la condición de aprendizaje inverso hubo una correlación negativa entre la rEEG dorsolateral-parietal del hemisferio derecho de la banda theta de la fase 3 y el puntaje acumulado, respecto a la condición de aprendizaje inicial (Figura 14). Es decir, que a menor puntaje acumulado durante la condición de aprendizaje inverso, mayor era la rEEG dorsolateral-parietal durante la fase 3.

Para la correlación entre el tiempo de reacción y la actividad electroencefalográfica prefrontal y parietal no se encontraron diferencias significativas entre condiciones en ninguna fase.

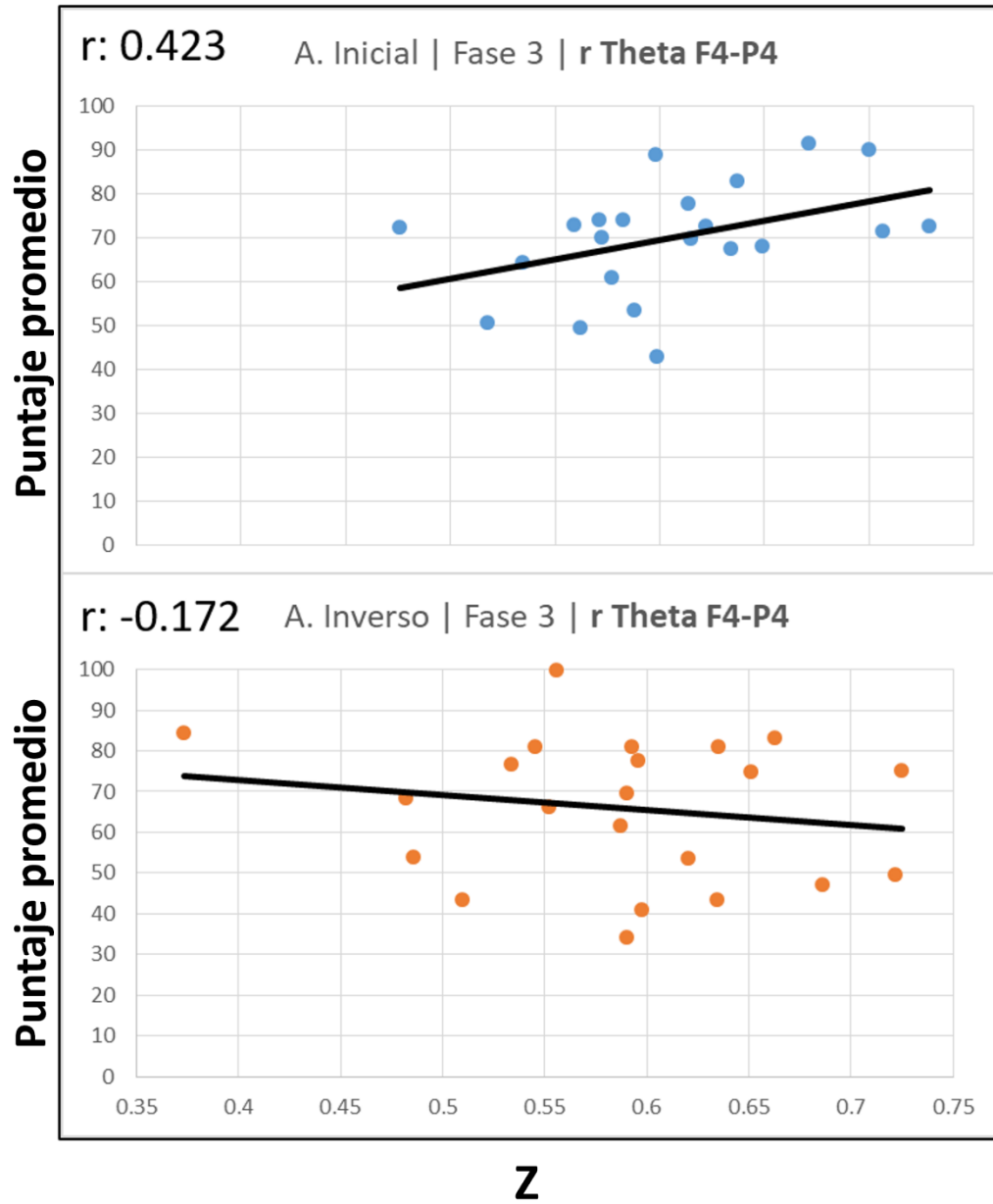


Figura 14. Comparación entre condiciones de las correlaciones entre puntaje acumulado y rEEG de la banda theta entre las cortezas dorsolateral y parietal derechas durante la fase 3.

Discusión

El presente estudio se llevó a cabo para determinar la diferente funcionalidad de estructuras prefrontales (frontopolar y dorsolateral) en conjunto con la corteza parietal durante la adaptación a los cambios en las contingencias del ambiente durante la toma de decisiones evaluado en una condición de aprendizaje inverso durante las fases de formación de preferencias y de evaluación del resultado de la toma de decisiones. La apuesta a priori era que, dadas las características individuales de estas dos fases y la funcionalidad prefrontal (específicamente en las áreas frontopolar y dorsolateral) en conjunto con la corteza parietal, estas estructuras evaluadas iban a participar de manera distinta en la evaluación de los estímulos necesaria para la adaptación en este tipo de condición durante el proceso de la TD.

Así mismo, se analizaron los datos conductuales con el fin de observar de manera objetiva como se ajustó el comportamiento a las demandas del contexto durante la toma de decisiones y para asociar tal ejecución conductual a la actividad electroencefalográfica cortical que subyace a dicho comportamiento. Así, durante los primeros ensayos hubo un menor puntaje relativo durante la condición de aprendizaje inverso en comparación de los primeros ensayos de la condición de aprendizaje inicial. Esto podría deberse a que los participantes aún mantenían la respuesta preponderante aprendida durante la condición de aprendizaje inicial, debido a que desconocían el cambio de los valores de las figuras ocurrido durante la condición de aprendizaje inverso. Al elegir las figuras que en la condición previa tenían los valores más altos, durante la condición de aprendizaje inverso obtuvieron otros resultados, por lo que el puntaje relativo en estos primeros ensayos fue bajo. Así mismo, pareciera que a partir del tercer y cuarto ensayo los participantes detectan

estos cambios en los valores de los estímulos e implementan una nueva respuesta con el objetivo de acumular el mayor puntaje posible. Lo anterior corresponde a lo reportado en otros trabajos de TD, donde las primeras elecciones suelen ser más variables al no tener información del contexto (similar a lo observado en el puntaje relativo de los primeros ensayos del aprendizaje inverso) sustentando que después del cambio de valores en los estímulos de la tarea, la respuesta de los participantes durante la TD era sin suficiente conocimiento del contexto, mismo que volvían a adquirir con la exposición continua a los estímulos (Lejarraga & Gonzalez, 2011). Sin embargo, en el contexto particular del aprendizaje inverso, el puntaje relativo de esta condición es menor al reflejar el promedio de la respuesta preponderante del grupo, en comparación con la condición de aprendizaje inicial donde el puntaje relativo representa la variación de respuesta entre quienes elegían las figuras con mayor puntaje y quienes elegían las de menor puntaje.

Por otro lado, del ensayo once en adelante se observa un patrón en donde hay mayor puntaje durante el aprendizaje inverso respecto al inicial. Es posible que, al no ser una tarea novedosa, ya que era el tercer bloque de ensayos que respondían, los participantes ya tuvieran una estrategia establecida para responderla y la actualización de los valores solo fuera problema en los primeros ensayos. Por tal motivo, el puntaje obtenido a partir del segundo cuarto de los ensayos fue mayor durante el aprendizaje inverso. Lo anterior coincide con lo reportado en la literatura, donde se refiere que al hacer uso de una estrategia óptima de elección, y conforme se avanza en la repetición de los ensayos, se logra una mayor eficiencia en el desempeño de la tarea (Newell & Rakow, 2007); la acumulación de la información se observa a través de una mejora gradual conforme avanzan los ensayos (Lejarraga & Gonzalez, 2011).

Además, el que los participantes modifiquen su respuesta obteniendo puntajes relativos arriba de 80 es un indicio de que su conducta sigue dirigida hacia alcanzar el mayor puntaje posible al conservar las figuras con mayor valor, aún durante la condición de aprendizaje inverso. Y, por lo tanto, de que los errores cometidos en los primeros ensayos de esta misma condición eran debidos a la respuesta dominante antes de advertir los cambios del contexto y no a una mera respuesta aleatoria. Como sustento a lo anterior, Bhushan y colaboradores (2012) han reportado que, conforme se aprende de los resultados obtenidos, la preferencia a los estímulos cambia; mientras que Gonzalez y Dutt (2011) refieren que se observa una menor variabilidad de respuesta al transcurrir cada ensayo de elección debido a que se van relacionando cuáles son las mejores opciones.

En la comparación del tiempo de reacción entre condiciones, no se muestra un patrón claro a lo largo de los 40 ensayos. Esto probablemente por la variabilidad de respuesta, ya que el participante no tenía un tiempo límite para responder. Según lo evidenciado en otras tareas de toma de decisiones, conforme se va acumulando información del contexto a través de las selecciones y retroalimentación obtenida, las respuestas no solo se vuelven mejores respecto a los puntajes obtenidos, sino también en la mayor rapidez al responder (Glöckner & Betsch, 2012). Sin embargo, en la tarea aplicada en el presente proyecto no se mostró disminución en el tiempo de reacción tampoco en las condiciones en lo particular, lo que pudiera deberse a las características propias del paradigma.

Respecto a la funcionalidad cortical que subyace a estos datos conductuales, el registro de la actividad electroencefalográfica, como técnica, tiene relevancia. Tanto por la alta resolución temporal que permite evaluar cambios en la actividad cortical durante

breves ventanas de tiempo como por la ventaja que brinda el poder descomponer la señal en diferentes rangos de frecuencias (cada uno asociado a diferente reactividad).

Así, en los resultados electroencefalográficos, durante la fase 1 de la toma de decisiones en la condición de aprendizaje inverso hubo mayor acoplamiento entre las cortezas parietal izquierda y derecha de la banda alfa2. Debido a su reactividad, la banda alfa en humanos ha sido dividida en alfa1 y alfa 2. En ese sentido, la banda alfa2 se ha visto involucrada en el procesamiento de la memoria semántica, principalmente (Klimesch, 1997; Klimesch et al., 1994); la corteza parietal, por su parte, también se ha reportado activada en relación al procesamiento en este tipo de memoria; esta memoria incluye el conocimiento sobre el mundo y sobre la cual recae parte del razonamiento, de la planificación y el conocimiento de hechos pasados; en otras palabras, la memoria semántica hace referencia al conocimiento del individuo sobre su contexto (Binder & Desai, 2011; Peraita & Moreno, 2003). Respecto a la fase de evaluación y formación de preferencias, es en esta fase donde se lleva a cabo la presentación de los estímulos y, como el nombre lo indica, se evalúan éstos previo a ser elegidos. Parece ser que la participación de la memoria semántica durante este momento es clave para la actualización de la información respecto a los valores previamente asociados. Además, en el contexto de la adaptación conductual, esta banda de frecuencias que va de los 10 a los 12 Hz, en específico en áreas parietales de ambos hemisferios (y sus conexiones con áreas prefrontales), se han relacionado con la organización de pensamientos y acciones, es decir, con el control cognitivo (Sadaghiani et al., 2019). Por lo que la participación parietal en la fase 1 del aprendizaje inverso podría estar relacionada, como parte del circuito prefronto-parietal, con

este control cognitivo necesario para actualizar y mantener los valores actuales de los estímulos, previo a elegir entre ellos.

Por otro lado, en la fase 3 de la toma de decisiones durante el aprendizaje inverso, hubo mayor potencia absoluta de la banda theta en la derivación correspondiente a dorsolateral izquierda. Esta banda ha sido reportada durante tareas que demandan la manipulación de la información en la memoria de trabajo; de igual manera, la corteza prefrontal dorsolateral se ha visto implicada en dicho procesamiento (Sauseng et al, 2005). Durante la fase 3 de la TD es donde el participante recibe la puntuación obtenida tras la elección realizada durante la fase anterior, por lo que se lleva a cabo una evaluación del resultado obtenido (Ernst & Paulus, 2005). Además, durante esta fase, pero en la condición del aprendizaje inverso, podría estarse llevando a cabo una actualización de la información en la relación entre el estímulo y el resultado con el fin de ajustar la conducta y lograr la meta (Nashiro et al., 2011, 2013). Por lo que el aumento de la actividad en la banda theta durante esta condición podría deberse a dicha actualización en la memoria de trabajo.

Además, en esta misma fase (3) durante el aprendizaje inverso hubo cambios en el grado de acoplamiento evaluado a través de la correlación electroencefalográfica, observado en una menor sincronía frontopolar-dorsolateral, en la banda alfa1. La disminución de esta banda se ha reportado en tareas que requieren mayor atención hacia los estímulos externos presentados (Klimesch, 2012). Mientras que la participación de áreas prefrontales se ha reportado en estudios que requieren control atencional hacia estímulos, incluso se ha evidenciado su participación en la detección de cambios en los estímulos que son relevantes para la tarea en curso (Pollmann, 2001, 2004). Como se mencionó anteriormente, durante la fase 3 de la toma de decisiones en el aprendizaje

inverso, tras obtener el puntaje del ensayo, es donde el participante detecta los cambios en la relación estímulo-resultado al recibir un puntaje diferente al esperado. Lo anterior podría estar indicando que se necesita un menor acoplamiento prefrontal de la banda alfa1 para detectar estos cambios durante el aprendizaje inverso.

En conjunto, con la actividad electroencefalográfica obtenida (tanto en la potencia absoluta como en la correlación electroencefalográfica) durante la fase 3 del aprendizaje inverso pareciera que las áreas prefrontales están participando en la actualización de la información en la relación estímulo-resultado, como se mencionó. Dicha actualización de la información estaría sustentada por una mayor atención hacia los estímulos externos, en este caso hacia el resultado obtenido, y una participación de la memoria de trabajo.

Además, esta actividad EEG encontrada en la fase 3 del aprendizaje inverso es similar con lo reportado por Boudewyn y Carter en (2018), quienes refieren una relación en mayor actividad en la banda theta y menor en la banda alfa durante el procesamiento de errores y el posterior ajuste conductual (relacionado también con el control cognitivo y la atención).

De manera conjunta, la actividad prefronto-parietal que subyace a la adecuada ejecución de ambas fases (1 y 3) podría estar relacionada con la adaptación conductual en la TD. Esto sustentado también por la correlación negativa entre el puntaje de la tarea y la actividad electroencefalográfica dorsolateral-parietal en la banda theta; es decir, a mayor actividad de estas zonas, menor era el puntaje obtenido por ensayo. Esto coincide tanto con los resultados electroencefalográficos como con los conductuales: durante esta condición donde se cambian los valores asociados a cada estímulo parece requerirse una mayor actividad electroencefalográfica prefronto-parietal durante la adaptación a las

contingencias de la tarea, lo que de inicio se ve reflejado en una menor ejecución conductual (reflejado en los puntos obtenidos por ensayo). Esto coincide con lo reportado en otros estudios: estas estructuras presentan mayor activación durante la presentación de información novedosa, respecto a la información ya familiarizada, en tareas de memoria, debido probablemente al procesamiento e integración de esta nueva información para la ejecución de la tarea (Kishiyama et al., 2009; Løvstad et al., 2012); además, la banda theta se ha relacionado con el procesamiento y actualización de la nueva información en la memoria de trabajo y con la adaptación conductual (Schutte et al., 2017).

Gran parte de los estudios que reportan las estructuras que subyacen al aprendizaje inverso describen la participación de la corteza orbitofrontal y la corteza ventromedial en la inhibición de la respuesta preponderante. Sin embargo, con los resultados obtenidos, tanto fisiológicos como conductuales, parece que la participación de otras estructuras prefrontales, como son la frontopolar y la dorsolateral, en conjunto con corteza parietal, son necesarias para la detección de los cambios entre los estímulos y los resultados, y en la actualización de la información, mediados por la atención y la memoria de trabajo, para poder lograr la adaptación a los cambios contextuales en la tarea de toma de decisiones. Además de que su participación es distinta entre la fase 1 y la fase 3 de la toma de decisiones, probablemente porque durante la última fase se esté procesando el nuevo resultado obtenido para, posteriormente, establecer nuevas preferencias durante la primera fase respecto a las previamente formadas.

Así, la participación de la corteza prefrontal estaría asociada a la flexibilidad cognitiva, como se ha reportado en diversos estudios (Chrysikou et al., 2013; Park & Moghaddam, 2017), en específico, en el cambio de respuesta ante la contingencia de

refuerzo durante la toma de decisiones. Sin embargo, esta participación sería diferente para cada área de la corteza prefrontal dada su funcionalidad, como se ha mencionado previamente: las áreas frontopolar y dorsolateral parecen tener una participación preponderante durante las fases 1 y 3 de la toma de decisiones, mientras que las áreas orbitofrontal y ventromedial, que están involucradas en la inhibición de la respuesta preponderante (Fellows & Farah, 2003; Frank & Claus, 2006), podrían estar participando mayormente durante la fase 2.

Conclusiones

- La detección de los cambios en la relación estímulo y recompensa ocurre en los primeros ensayos del aprendizaje inverso.
- La participación de las cortezas frontopolar, prefrontal dorsolateral y parietal está relacionada de manera diferente entre las fases de formación de preferencias y de evaluación del resultado de la toma de decisiones, durante el aprendizaje inverso.
- Durante la fase de formación de preferencias, la corteza parietal se relaciona con la representación de los nuevos valores sobre los anteriores; mientras que, durante la fase de evaluación del resultado, la corteza prefrontal se relaciona con la actualización del resultado.
- Durante la toma de decisiones, para lograr la actualización de la información respecto a la relación entre el estímulo y la recompensa, se requiere de la actividad conjunta de las cortezas prefrontal y parietal.

Referencias

- Adleman, N. E., Kayser, R., Dickstein, D., Blair, R. J. R., Pine, D., & Leibenluft, E. (2011). Neural correlates of reversal learning in severe mood dysregulation and pediatric bipolar disorder. *Journal of the American Academy of Child & Adolescent Psychiatry*, 50(11), 1173-1185.e2. <https://doi.org/10.1016/j.jaac.2011.07.011>
- Albein-Urios, N., Chase, H., Clark, L., Kirkovski, M., Davies, C., & Enticott, P. G. (2019). Increased perseverative errors following high-definition transcranial direct current stimulation over the ventrolateral cortex during probabilistic reversal learning. *Brain Stimulation*, 12(4), 959-966. <https://doi.org/10.1016/j.brs.2019.02.013>
- Andersen, R. A., & Cui, H. (2009). Intention, action planning, and decision making in parietal-frontal circuits. *Neuron*, 63(5), 568-583. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2009.08.028>
- Axelrod, B. N., Goldman, R. S., Heaton, R. K., Curtiss, G., Thompson, L. L., Chelune, G. J., & Kay, G. G. (1996). Discriminability of the Wisconsin Card Sorting Test Using the standardization sample. *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology*, 18(3), 338-342. <https://doi.org/10.1080/01688639608408991>
- Bartoli, E., Conner, C. R., Kadipasaoglu, C. M., Yellapantula, S., Rollo, M. J., Carter, C. S., & Tandon, N. (2018). Temporal dynamics of human frontal and cingulate neural activity during conflict and cognitive control. *Cerebral Cortex*, 28(11), 3842-3856. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhx245>

- Bhushan, V., Saha, G., Lindsen, J., Shimojo, S., & Bhattacharya, J. (2012). How we choose one over another: Predicting trial-by-trial preference decision. *PLoS ONE*, 7(8), e43351. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0043351>
- Binder, J. R., & Desai, R. H. (2011). The neurobiology of semantic memory. *Trends in Cognitive Sciences*, 15(11), 527-536. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2011.10.001>
- Boorman, E. D., Behrens, T. E. J., Woolrich, M. W., & Rushworth, M. F. S. (2009). How green is the grass on the other side? frontopolar cortex and the evidence in favor of alternative courses of action. *Neuron*, 62(5), 733-743. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2009.05.014>
- Boorman, E. D., Behrens, T. E., & Rushworth, M. F. (2011). Counterfactual choice and learning in a neural network centered on human lateral frontopolar cortex. *PLoS Biology*, 9(6), e1001093. <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.1001093>
- Boudewyn, M. A., & Carter, C. S. (2018). Electrophysiological correlates of adaptive control and attentional engagement in patients with first episode schizophrenia and healthy young adults. *Psychophysiology*, 55(3), e12820. <https://doi.org/10.1111/psyp.12820>
- Boulougouris, V., Dalley, J. W., & Robbins, T. W. (2007). Effects of orbitofrontal, infralimbic and prelimbic cortical lesions on serial spatial reversal learning in the rat. *Behavioural Brain Research*, 179(2), 219-228. <https://doi.org/10.1016/j.bbr.2007.02.005>
- Brehmer, B. (1996). Man as a stabiliser of systems: From static snapshots of judgement processes to dynamic decision making. *Thinking & Reasoning*, 2(2-3), 225-238. <https://doi.org/10.1080/135467896394528>

- Buriticá-Ramírez, E., & Pimienta-Jiménez, H. J. (2007). *Corteza frontopolar humana: área 10*. 16.
- Castelli, I., Massaro, D., Sanfey, A. G., & Marchetti, A. (2010). Fairness and intentionality in children's decision-making. *International Review of Economics*, 57(3), 269-288. <https://doi.org/10.1007/s12232-010-0101-x>
- Christie, G. J., & Tata, M. S. (2009). Right frontal cortex generates reward-related theta-band oscillatory activity. *NeuroImage*, 48(2), 415-422. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2009.06.076>
- Christoff, K., & Gabrieli, J. D. E. (2000). *The frontopolar cortex and human cognition: Evidence for a rostrocaudal hierarchical organization within the human prefrontal cortex*. 19.
- Chrysikou, E. G., Hamilton, R. H., Coslett, H. B., Datta, A., Bikson, M., & Thompson-Schill, S. L. (2013). Noninvasive transcranial direct current stimulation over the left prefrontal cortex facilitates cognitive flexibility in tool use. *Cognitive Neuroscience*, 4(2), 81-89. <https://doi.org/10.1080/17588928.2013.768221>
- Clark, L., Cools, R., & Robbins, T. W. (2004). The neuropsychology of ventral prefrontal cortex: Decision-making and reversal learning. *Brain and Cognition*, 55(1), 41-53. [https://doi.org/10.1016/S0278-2626\(03\)00284-7](https://doi.org/10.1016/S0278-2626(03)00284-7)
- Cortes, P. M., García-Hernández, J. P., Iribe-Burgos, F. A., Hernández-González, M., Sotelo-Tapia, C., & Guevara, M. A. (2021). Temporal division of the decision-making process: An EEG study. *Brain Research*, 147592. <https://doi.org/10.1016/j.brainres.2021.147592>.

- Daum, I., Schugens, M. M., Channon, S., Polkey, C. E., & Gray, J. A. (1991). T-Maze discrimination and reversal learning after unilateral temporal or frontal lobe lesions in man. *Cortex*, *27*(4), 613-622. [https://doi.org/10.1016/S0010-9452\(13\)80010-X](https://doi.org/10.1016/S0010-9452(13)80010-X)
- D’Cruz, A.-M., Ragozzino, M. E., Mosconi, M. W., Pavuluri, M. N., & Sweeney, J. A. (2011). Human reversal learning under conditions of certain versus uncertain outcomes. *NeuroImage*, *56*(1), 315-322. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2011.01.068>
- Decker, S. L., Fillmore, P. T., & Roberts, A. M. (2017). Coherence: The measurement and application of brain connectivity. *NeuroRegulation*, *4*(1), 3-13. <https://doi.org/10.15540/nr.4.1.3>
- Denney, D. A., Ringe, W. K., & Lacritz, L. H. (2015). Dyadic short forms of the Wechsler Adult Intelligence Scale-IV. *Archives of Clinical Neuropsychology*, *30*(5), 404-412. <https://doi.org/10.1093/arclin/acv035>
- Dickstein, D. P., Finger, E. C., Skup, M., Pine, D. S., Blair, J. R., & Leibenluft, E. (2010). Altered neural function in pediatric bipolar disorder during reversal learning: Reversal learning in pediatric bipolar disorder. *Bipolar Disorders*, *12*(7), 707-719. <https://doi.org/10.1111/j.1399-5618.2010.00863.x>
- Dixon, M. L., & Christoff, K. (2014). The lateral prefrontal cortex and complex value-based learning and decision making. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, *45*, 9-18. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2014.04.011>
- Doya, K. (2008). Modulators of decision making. *Nature Neuroscience*, *11*(4), 410-416. <https://doi.org/10.1038/nn2077>

- Ernst, M., & Paulus, M. P. (2005). Neurobiology of decision making: A selective review from a neurocognitive and clinical perspective. *Biological Psychiatry*, *58*(8), 597-604. <https://doi.org/10.1016/j.biopsych.2005.06.004>
- Fellows, L. K., & Farah, M. J. (2003). Ventromedial frontal cortex mediates affective shifting in humans: Evidence from a reversal learning paradigm. *Brain*, *126*(8), 1830-1837. <https://doi.org/10.1093/brain/awg180>
- Frank, M. J., & Claus, E. D. (2006). Anatomy of a decision: Striato-orbitofrontal interactions in reinforcement learning, decision making, and reversal. *Psychological Review*, *113*(2), 300-326. <https://doi.org/10.1037/0033-295X.113.2.300>
- Fuster, J. M. (2001). *The prefrontal cortex—an update: Time is of the essence*.
- García-Hernández, J. P. (2019). *Actividad electroencefalográfica de la corteza frontopolar en las fases de la toma de decisiones*. Universidad de Guadalajara.
- Glöckner, A., & Betsch, T. (2012). Decisions beyond boundaries: When more information is processed faster than less. *Acta Psychologica*, *139*(3), 532-542. <https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2012.01.009>
- Gola, M., Magnuski, M., Szumska, I., & Wróbel, A. (2013). EEG beta band activity is related to attention and attentional deficits in the visual performance of elderly subjects. *International Journal of Psychophysiology*, *89*(3), 334-341. <https://doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2013.05.007>
- Gold, J. I., & Shadlen, M. N. (2007). Neural computations that underlie decisions about sensory stimuli. *Trends in Cognitive Sciences*, *5*(1), 10-16. [https://doi.org/10.1016/S1364-6613\(00\)01567-9](https://doi.org/10.1016/S1364-6613(00)01567-9)

- Gonzalez, C., & Dutt, V. (2011). Instance-based learning: Integrating sampling and repeated decisions from experience. *Psychological Review*, *118*(4), 523-551.
<https://doi.org/10.1037/a0024558>
- Grant, S., Contoreggi, C., & London, E. D. (2000). *Drug abusers show impaired performance in a laboratory test of decision making* p. 8.
- Greening, S. G., Finger, E. C., & Mitchell, D. G. V. (2011). Parsing decision making processes in prefrontal cortex: Response inhibition, overcoming learned avoidance, and reversal learning. *NeuroImage*, *54*(2), 1432-1441.
<https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2010.09.017>
- Greenstein, B., & Greenstein, A. (1999). *Color atlas of neuroscience*. Georg Thieme Verlag. <https://doi.org/10.1055/b-005-148864>
- Groman, S. M., James, A. S., Seu, E., Crawford, M. A., Harpster, S. N., & Jentsch, J. D. (2013). Monoamine levels within the orbitofrontal cortex and putamen interact to predict reversal learning performance. *Biological Psychiatry*, *73*(8), 756-762.
<https://doi.org/10.1016/j.biopsych.2012.12.002>
- Guevara, M. A. G., Aguirre, F. A. R., Quirarte, G. L., & González, M. H. (2009). *Orbitofrontal cortex inactivation impairs early reversal learning in male rats during a sexually motivated task*. 20.
- Guevara, M. A., Hernández-González, M., Sanz-Martin, A., & Amezcua-Gutiérrez, C. (2015). *Registro y análisis automatizado de señales bioeléctricas cerebrales durante la ejecución sexual*. Universidad de Guadalajara.

- Guevara, M. A., Ramos, J., & Corsi-Cabrera, M. (1997). *Un método práctico para el espectro de correlación entre señales electroencefalográficas para evaluar relaciones funcionales*. *14*(1), 5-12.
- Guevara, M. A., Sanz-Martín, A., Corsi-Cabrera, M., Amezcua-Gutiérrez, C., & Hernández-González, M. (2010). CHECAsEN: programa para revisar señales EEG fuera de línea. *Revista Mexicana de Ingeniería Biomédica*, *7*.
- Guevara, M. A., Sanz-Martin, A., & Hernández-González, M. (2014). EEGbands: A computer program to statistically analyze parameters of electroencephalographic signals. *Journal of Behavioral and Brain Science*, *04*(07), 308-324.
<https://doi.org/10.4236/jbbs.2014.47032>
- Hampshire, A., Chaudhry, A. M., Owen, A. M., & Roberts, A. C. (2012). Dissociable roles for lateral orbitofrontal cortex and lateral prefrontal cortex during preference driven reversal learning. *NeuroImage*, *59*(4), 4102-4112.
<https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2011.10.072>
- Hampshire, A., & Owen, A. M. (2005). Fractionating attentional control using event-related fMRI. *Cerebral Cortex*, *16*(12), 1679-1689.
<https://doi.org/10.1093/cercor/bhj116>
- Harmony, T., Fernández, T., Silva, J., Bernal, J., Díaz-Comas, L., Reyes, A., Marosi, E., Rodríguez, M., & Rodríguez, M. (1996). EEG delta activity: An indicator of attention to internal processing during performance of mental tasks. *International Journal of Psychophysiology*, *24*(1-2), 161-171. [https://doi.org/10.1016/S0167-8760\(96\)00053-0](https://doi.org/10.1016/S0167-8760(96)00053-0)

- Hauser, T. U., Iannaccone, R., Walitza, S., Brandeis, D., & Brem, S. (2015). *Cognitive flexibility in adolescence: Neural and behavioral mechanisms of reward prediction error processing in adaptive decision making during development.*
- Homan, R. W. (1988). The 10-20 electrode system and cerebral location. *American Journal of EEG Technology*, 28(4), 269-279.
<https://doi.org/10.1080/00029238.1988.11080272>
- Izquierdo, A., Brigman, J. L., Radke, A. K., Rudebeck, P. H., & Holmes, A. (2017). The neural basis of reversal learning: An updated perspective. *Neuroscience*, 345, 12-26. <https://doi.org/10.1016/j.neuroscience.2016.03.021>
- Jacobs, B. (2001). Regional dendritic and spine variation in human cerebral cortex: A quantitative golgi study. *Cerebral Cortex*, 11(6), 558-571.
<https://doi.org/10.1093/cercor/11.6.558>
- Jasper, M. D. (1958). Report of the committee on methods of clinical examination in electroencephalography. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 10(2), 370-375. [https://doi.org/10.1016/0013-4694\(58\)90053-1](https://doi.org/10.1016/0013-4694(58)90053-1)
- Kandel, E. R., Schwartz, J. H., Jessell, T. M., Siegelbaum, S. A., & Hudspeth, A. J. (2013). *Principles of neural science*. New York: McGraw-Hill. (5th ed.). McGraw-Hill.
- Kim, P., Jenkins, S. E., Connolly, M. E., Deveney, C. M., Fromm, S. J., Brotman, M. A., Nelson, E. E., Pine, D. S., & Leibenluft, E. (2012). Neural correlates of cognitive flexibility in children at risk for bipolar disorder. *Journal of Psychiatric Research*, 46(1), 22-30. <https://doi.org/10.1016/j.jpsychires.2011.09.015>

- Kishiyama, M. M., Yonelinas, A. P., & Knight, R. T. (2009). Novelty enhancements in memory are dependent on lateral prefrontal cortex. *Journal of Neuroscience*, 29(25), 8114-8118. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.5507-08.2009>
- Klanker, M., Feenstra, M., & Denys, D. (2013). Dopaminergic control of cognitive flexibility in humans and animals. *Frontiers in Neuroscience*, 7. <https://doi.org/10.3389/fnins.2013.00201>
- Klimesch, W. (1996). Memory processes, brain oscillations and EEG synchronization. *International Journal of Psychophysiology*, 24(1-2), 61-100. [https://doi.org/10.1016/S0167-8760\(96\)00057-8](https://doi.org/10.1016/S0167-8760(96)00057-8)
- Klimesch, W. (1997). EEG-alpha rhythms and memory processes. *International Journal of Psychophysiology*, 26(1-3), 319-340. [https://doi.org/10.1016/S0167-8760\(97\)00773-3](https://doi.org/10.1016/S0167-8760(97)00773-3)
- Klimesch, W. (1999). EEG alpha and theta oscillations reflect cognitive and memory performance: A review and analysis. *Brain Research Reviews*, 29(2-3), 169-195. [https://doi.org/10.1016/S0165-0173\(98\)00056-3](https://doi.org/10.1016/S0165-0173(98)00056-3)
- Klimesch, W. (2012). Alpha-band oscillations, attention, and controlled access to stored information. *Trends in Cognitive Sciences*, 16(12), 606-617. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2012.10.007>
- Klimesch, W., Schimke, H., & Schwaiger, J. (1994). Episodic and semantic memory: An analysis in the EEG theta and alpha band. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 91(6), 428-441. [https://doi.org/10.1016/0013-4694\(94\)90164-3](https://doi.org/10.1016/0013-4694(94)90164-3)
- Knutson, B., Fong, G. W., Bennett, S. M., Adams, C. M., & Hommer, D. (2003). A region of mesial prefrontal cortex tracks monetarily rewarding outcomes:

- Characterization with rapid event-related fMRI. *NeuroImage*, 18(2), 263-272.
[https://doi.org/10.1016/S1053-8119\(02\)00057-5](https://doi.org/10.1016/S1053-8119(02)00057-5)
- Koechlin, E., Basso, G., Pietrini, P., Panzer, S., & Grafman, J. (1999). *The role of the anterior prefrontal cortex in human cognition*. 148-151.
- Koechlin, E., & Hyafil, A. (2007). Anterior prefrontal function and the limits of human decision-making. *Science*, 318(5850), 594-598.
<https://doi.org/10.1126/science.1142995>
- Kondo, H., Osaka, N., & Osaka, M. (2004). Cooperation of the anterior cingulate cortex and dorsolateral prefrontal cortex for attention shifting. *NeuroImage*, 23(2), 670-679. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2004.06.014>
- Kosaki, Y., & Watanabe, S. (2012). Dissociable roles of the medial prefrontal cortex, the anterior cingulate cortex, and the hippocampus in behavioural flexibility revealed by serial reversal of three-choice discrimination in rats. *Behavioural Brain Research*, 227(1), 81-90. <https://doi.org/10.1016/j.bbr.2011.10.039>
- Krawczyk, D. C. (2002). Contributions of the prefrontal cortex to the neural basis of human decision making. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 26(6), 631-664.
[https://doi.org/10.1016/S0149-7634\(02\)00021-0](https://doi.org/10.1016/S0149-7634(02)00021-0)
- Kristan, W. B. (2008). Neuronal decision-making circuits. *Current Biology*, 18(19), R928-R932. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2008.07.081>
- lehr, a., henneberg, n., nigam, t., paulus, w., & antal, a. (2019). modulation of conflict processing by theta-range tACS over the dorsolateral prefrontal cortex. *Neural Plasticity*, 2019, 1-13. <https://doi.org/10.1155/2019/6747049>

- Lejarraga, T., & Gonzalez, C. (2011). Effects of feedback and complexity on repeated decisions from description. *Organizational Behavior and Human Decision Processes*, *116*(2), 286-295. <https://doi.org/10.1016/j.obhdp.2011.05.001>
- Levy, R., & Goldman-Rakic, P. S. (2000). Segregation of working memory functions within the dorsolateral prefrontal cortex. *Experimental Brain Research*, *133*(1), 23-32. <https://doi.org/10.1007/s002210000397>
- Liu, T., Shi, J., Zhao, D., & Yang, J. (2008). The relationship between EEG band power, cognitive processing and intelligence in school-age children. *Cognitive Processing*, *10*.
- Løvstad, M., Funderud, I., Lindgren, M., Endestad, T., Due-Tønnessen, P., Meling, T., Voytek, B., Knight, R. T., & Solbakk, A.-K. (2012). Contribution of subregions of human frontal cortex to novelty processing. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *24*(2), 378-395. https://doi.org/10.1162/jocn_a_00099
- Mansouri, F. A., Koehlin, E., Rosa, M. G. P., & Buckley, M. J. (2017). Managing competing goals—A key role for the frontopolar cortex. *Nature Reviews Neuroscience*, *18*(11), 645-657. <https://doi.org/10.1038/nrn.2017.111>
- Marschner, A., Mell, T., Wartenburger, I., Villringer, A., Reischies, F. M., & Heekeren, H. R. (2005). Reward-based decision-making and aging. *Brain Research Bulletin*, *67*(5), 382-390. <https://doi.org/10.1016/j.brainresbull.2005.06.010>
- Martínez Selva, J. M., Sánchez Navarro, J. P., Bechara, A., & Román Lapuente, F. (2006). Mecanismos cerebrales de la toma de decisiones. *Revista de Neurología*, *42*(07), 411. <https://doi.org/10.33588/rn.4207.2006161>

- Nashiro, K., Mather, M., Gorlick, M. A., & Nga, L. (2011). Negative emotional outcomes impair older adults' reversal learning. *Cognition & Emotion*, *25*(6), 1014-1028.
<https://doi.org/10.1080/02699931.2010.542999>
- Nashiro, K., Sakaki, M., Nga, L., & Mather, M. (2013). Age-related similarities and differences in brain activity underlying reversal learning. *Frontiers in Integrative Neuroscience*, *7*. <https://doi.org/10.3389/fnint.2013.00037>
- Newell, B. R., & Rakow, T. (2007). The role of experience in decisions from description. *Psychonomic Bulletin & Review*, *14*(6), 1133-1139.
<https://doi.org/10.3758/BF03193102>
- Niedermeyer, E., & da Silva, F. L. (2005). *Electroencephalography: Basic principles, clinical applications, and related fields*. Lippincott Williams & Wilkins.
- Okamoto, M., Dan, H., Sakamoto, K., Takeo, K., Shimizu, K., Kohno, S., Oda, I., Isobe, S., Suzuki, T., Kohyama, K., & Dan, I. (2004). Three-dimensional probabilistic anatomical cranio-cerebral correlation via the international 10–20 system oriented for transcranial functional brain mapping. *NeuroImage*, *21*(1), 99-111.
<https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2003.08.026>
- Okuda, J., Fujii, T., Yamadori, A., Kawashima, R., Tsukiura, T., Fukatsu, R., Suzuki, K., Ito, M., & Fukuda, H. (1998). Participation of the prefrontal cortices in prospective memory: Evidence from a PET study in humans. *Neuroscience Letters*, *253*(2), 127-130. [https://doi.org/10.1016/S0304-3940\(98\)00628-4](https://doi.org/10.1016/S0304-3940(98)00628-4)
- Öngür, D., Ferry, A. T., & Price, J. L. (2003). Architectonic subdivision of the human orbital and medial prefrontal cortex. *The Journal of Comparative Neurology*, *460*(3), 425-449. <https://doi.org/10.1002/cne.10609>

- Ostrosky-Solís, F., Gómez, M. E., Villaseñor, E. M., Roselli, M., Ardila, A., & Pineda, D. (2013). *Neuropsi: Atención y memoria: 6 a 85 años*. American Book Store.
- Park, J., & Moghaddam, B. (2017). Impact of anxiety on prefrontal cortex encoding of cognitive flexibility. *Neuroscience*, *345*, 193-202.
<https://doi.org/10.1016/j.neuroscience.2016.06.013>
- Paulus, M. P., Hozack, N., Zauscher, B., McDowell, J. E., Frank, L., Brown, G. G., & Braff, D. L. (2001). Prefrontal, parietal, and temporal cortex networks underlie decision-making in the presence of uncertainty. *NeuroImage*, *13*(1), 91-100.
<https://doi.org/10.1006/nimg.2000.0667>
- Pedrero Pérez, E. J., Ruiz Sánchez de León, J. M., Lozoya Delgado, P., Llanero Luque, M., Rojo Mota, G., & Puerta García, C. (2011). Evaluación de los síntomas frontales: Propiedades psicométricas y datos normativos del cuestionario disejecutivo (DEX) en una muestra de población española. *Revista de Neurología*, *52*(07), 394. <https://doi.org/10.33588/rn.5207.2010731>
- Peraita, H., & Moreno, F. J. (2003). Revisión del estado actual del campo de la memoria semántica. *Universitat de Barcelona*, 16.
- Petrides, M., & Pandya, D. N. (1999). Dorsolateral prefrontal cortex: Comparative cytoarchitectonic analysis in the human and the macaque brain and corticocortical connection patterns: Dorsolateral prefrontal cortex in human and monkey. *European Journal of Neuroscience*, *11*(3), 1011-1036.
<https://doi.org/10.1046/j.1460-9568.1999.00518.x>
- Platt, M. L. (2002). Neural correlates of decisions. *Current Opinion in Neurobiology*, *12*(2), 141-148. [https://doi.org/10.1016/S0959-4388\(02\)00302-1](https://doi.org/10.1016/S0959-4388(02)00302-1)

- Pollmann, S. (2001). Switching between dimensions, locations, and responses: The role of the left frontopolar cortex. *NeuroImage*, *14*(1), S118-S124.
<https://doi.org/10.1006/nimg.2001.0837>
- Pollmann, S. (2004). Anterior prefrontal cortex contributions to attention control. *Experimental Psychology*, *51*(4), 270-278. <https://doi.org/10.1027/1618-3169.51.4.270>
- Ragozzino, M. E., & Rozman, S. (2007). The effect of rat anterior cingulate inactivation on cognitive flexibility. *Behavioral Neuroscience*, *121*(4), 698-706.
<https://doi.org/10.1037/0735-7044.121.4.698>
- Ramírez, C., García, A., & Valdez, P. (2012). Identification of circadian rhythms in cognitive inhibition and flexibility using a Stroop task: Circadian rhythms in executive functions. *Sleep and Biological Rhythms*, *10*(2), 136-144.
<https://doi.org/10.1111/j.1479-8425.2012.00540.x>
- Ramnani, N., & Owen, A. M. (2004). Anterior prefrontal cortex: Insights into function from anatomy and neuroimaging. *Nature Reviews Neuroscience*, *5*(3), 184-194.
<https://doi.org/10.1038/nrn1343>
- Ramos-Argüelles, F., Morales, G., Egozcue, S., Pabón, R. M., & Alonso, M. T. (2009). Técnicas básicas de electroencefalografía: Principios y aplicaciones clínicas. *An. Sist. Sanit. Navar.*, *32*, 14.
- Rieder, M. K., Rahm, B., Williams, J. D., & Kaiser, J. (2011). Human gamma-band activity and behavior. *International Journal of Psychophysiology*, *79*(1), 39-48.
<https://doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2010.08.010>

- Rolls, E. T., Hornak, J., Wade, D., & McGrath, J. (1994). Emotion-related learning in patients with social and emotional changes associated with frontal lobe damage. *Journal of Neurology, Neurosurgery & Psychiatry*, *57*(12), 1518-1524. <https://doi.org/10.1136/jnnp.57.12.1518>
- Rossi, S., Cappa, S. F., Babiloni, C., Pasqualetti, P., Miniussi, C., Carducci, F., Babiloni, F., & Rossini, P. M. (2001). Prefrontal cortex in long-term memory: An “interference” approach using magnetic stimulation. *Nature Neuroscience*, *4*(9), 948-952. <https://doi.org/10.1038/nn0901-948>
- Rubia, K., Smith, A. B., Brammer, M. J., & Taylor, E. (2003). Right inferior prefrontal cortex mediates response inhibition while mesial prefrontal cortex is responsible for error detection. *NeuroImage*, *20*(1), 351-358. [https://doi.org/10.1016/S1053-8119\(03\)00275-1](https://doi.org/10.1016/S1053-8119(03)00275-1)
- Sadaghiani, S., Dombert, P. L., Løvstad, M., Funderud, I., Meling, T. R., Endestad, T., Knight, R. T., Solbakk, A.-K., & D’Esposito, M. (2019). Lesions to the fronto-parietal network impact alpha-band phase synchrony and cognitive control. *Cerebral Cortex*. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhy296>
- Salvador, J., Cortés, J. F., & Galindo, G. (2000). *¿Qué significado neuropsicológico tiene la perseveración de los pacientes con esquizofrenia paranoide en el Wisconsin Card Sorting Test?* *4*, 28-37.
- Sauseng, P., Klimesch, W., Doppelmayr, M., Hanslmayr, S., Schabus, M., & Gruber, W. R. (2004). Theta coupling in the human electroencephalogram during a working memory task. *Neuroscience Letters*, *354*(2), 123-126. <https://doi.org/10.1016/j.neulet.2003.10.002>

- Sauseng, P., Klimesch, W., Schabus, M., & Doppelmayr, M. (2005). Fronto-parietal EEG coherence in theta and upper alpha reflect central executive functions of working memory. *International Journal of Psychophysiology*, *57*(2), 97-103.
<https://doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2005.03.018>
- Schutte, I., Kenemans, J. L., & Schutter, D. J. L. G. (2017). Resting-state theta/beta EEG ratio is associated with reward- and punishment-related reversal learning. *Cognitive, Affective, & Behavioral Neuroscience*, *17*(4), 754-763.
<https://doi.org/10.3758/s13415-017-0510-3>
- Semendeferi, K., Armstrong, E., Schleicher, A., Zilles, K., & Hoesen, G. W. V. (2001). *Prefrontal cortex in humans and apes: A comparative study of area 10*. 18.
- Sheppard, J. P., Raposo, D., & Churchland, A. K. (2013). Dynamic weighting of multisensory stimuli shapes decision-making in rats and humans. *Journal of Vision*, *13*(6), 4-4. <https://doi.org/10.1167/13.6.4>
- Silton, R. L., Heller, W., Towers, D. N., Engels, A. S., Spielberg, J. M., Edgar, J. C., Sass, S. M., Stewart, J. L., Sutton, B. P., Banich, M. T., & Miller, G. A. (2010). The time course of activity in dorsolateral prefrontal cortex and anterior cingulate cortex during top-down attentional control. *NeuroImage*, *50*(3), 1292-1302.
<https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2009.12.061>
- Smith, E. E., & Kosslyn, S. M. (2008). *Procesos Cognitivos*. 682.
- Strange, B. A., Henson, R. N. A., Friston, K. J., & Dolan, R. J. (2001). Anterior Prefrontal cortex mediates rule learning in humans. *Cerebral Cortex*, *11*(11), 1040-1046. <https://doi.org/10.1093/cercor/11.11.1040>

- Subramaniam, K., Hinkley, L. B. N., Mizuiri, D., Kothare, H., Cai, C., Garrett, C., Findlay, A., Houde, J. F., & Nagarajan, S. S. (2019). Beta-band activity in medial prefrontal cortex predicts source memory encoding and retrieval accuracy. *Scientific Reports*, 9(1), 6814. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-43291-7>
- Tang, D., Hu, L., & Chen, A. (2013). The neural oscillations of conflict adaptation in the human frontal region. *Biological Psychology*, 93(3), 364-372. <https://doi.org/10.1016/j.biopsycho.2013.03.004>
- Tirapu-Ustárroz, J., & Luna-Lario, P. (2008). Neuropsicología de las funciones ejecutivas. 2, 2, 219-259.
- Ustárroz, J. T., Molina, A. G., Lario, P. L., García, A. V., & Lago, M. R. (2012). *Corteza prefrontal, funciones ejecutivas y regulación de la conducta*. 34.
- van Driel, J., Ridderinkhof, K. R., & Cohen, M. X. (2012). Not all errors are alike: theta and alpha eeg dynamics relate to differences in error-processing Dynamics. *Journal of Neuroscience*, 32(47), 16795-16806. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.0802-12.2012>
- Vickery, T. J., & Jiang, Y. V. (2009). Inferior parietal lobule supports decision making under uncertainty in humans. *Cerebral Cortex*, 19(4), 916-925. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhn140>
- Walter, W. G. (1936). *The location of cerebral tumours by electro-encephalography*. 228(5893), 305-308.
- Walter, W. G., & Dovey, V. J. (1944). Electro-encephalography in cases of sub-cortical tumour. *Journal of Neurology, Neurosurgery & Psychiatry*, 7(3-4), 57-65. <https://doi.org/10.1136/jnnp.7.3-4.57>

- Walton, M. E., Crosson, P. L., Behrens, T. E. J., Kennerley, S. W., & Rushworth, M. F. S. (2007). Adaptive decision making and value in the anterior cingulate cortex. *NeuroImage*, *36*, T142-T154. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2007.03.029>
- Wang, X.-J. (2008). Decision making in recurrent neuronal circuits. *Neuron*, *60*(2), 215-234. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2008.09.034>
- Wenzlaff, H., Bauer, M., Maess, B., & Heekeren, H. R. (2011). Neural characterization of the speed-accuracy tradeoff in a perceptual decision-making task. *Journal of Neuroscience*, *31*(4), 1254-1266. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.4000-10.2011>
- Wilson, C. R. E., & Gaffan, D. (2008). Prefrontal-inferotemporal interaction is not always necessary for reversal learning. *Journal of Neuroscience*, *28*(21), 5529-5538. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.0952-08.2008>
- Wischnewski, M., Zerr, P., & Schutter, D. J. L. G. (2016). Effects of theta transcranial alternating current stimulation over the frontal cortex on reversal learning. *Brain Stimulation*, *9*(5), 705-711. <https://doi.org/10.1016/j.brs.2016.04.011>
- Wright, J. D., & Hodgson, D. G. (2015). *International Encyclopedia of the Social & Behavioral Sciences* (Second). Elsevier.
- Xue, G., Xue, F., Droutman, V., Lu, Z.-L., Bechara, A., & Read, S. (2013). Common neural mechanisms underlying reversal learning by reward and punishment. *PLoS ONE*, *8*(12), e82169. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0082169>
- Yoshida, W., & Ishii, S. (2006). Resolution of uncertainty in prefrontal cortex. *Neuron*, *50*(5), 781-789. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2006.05.006>

Anexos

Anexo 1. Consentimiento Informado

Formato informativo y solicitud de consentimiento

INSTITUTO DE NEUROCIENCIAS – UNIVERSIDAD DE GUADALAJARA.

LABORATORIO DE CORRELACIÓN ELECTROENCEFALOGRÁFICA Y CONDUCTA

Usted está invitado a participar en un estudio de investigación orientado a evaluar el efecto de la toma de decisiones sobre la actividad eléctrica cerebral. Por esta razón, a través de este formato, le estamos solicitando su consentimiento para realizarle un registro electroencefalográfico y hacer una evaluación psicométrica.

INFORMACIÓN

1. Los procedimientos que se seguirán son métodos NO INVASIVOS e indoloros.
2. Tanto los directores del proyecto como los responsables de las sesiones de registro y análisis de datos son profesionales en el área de la investigación y están ampliamente capacitados para llevar a cabo este proyecto.
3. La identidad de todos los participantes en los registros se mantendrá anónima.
4. La información y los resultados de la investigación no serán usados para ningún propósito engañoso.
5. Todos los datos que resulten relevantes para el interés científico serán publicados en revistas especializadas y representará los datos de toda una muestra.

RIESGOS

No hay riesgos previsibles en esta investigación ni antes ni después del registro electroencefalográfico. Como se mencionó anteriormente, la identidad de todos los participantes que sean registrados se mantendrá anónima.

BENEFICIOS

En el campo clínico, el registro electroencefalográfico es una técnica ampliamente utilizada en el diagnóstico de alteraciones de la actividad eléctrica cerebral, como son déficit a detección de estímulos, epilepsia, entre otras. Ya que este estudio no es clínico, sino de investigación básica, al participar en este proyecto contribuirá de manera importante a la generación del conocimiento científico.

NIVEL DE CONFIANZA

Los datos y resultados de la investigación no estarán al acceso de personas que no formen parte del grupo de trabajo del laboratorio de Correlación electroencefalográfica y conducta, ni serán usados sin el permiso del jefe del mismo.

Si usted tiene preguntas acerca de este estudio, o de los procedimientos, puede contactar al responsable del proyecto, Dr. Miguel Ángel Guevara Pérez: Instituto de Neurociencias, Universidad de Guadalajara. Calle Francisco de Quevedo 180, col. Arcos Vallarta, Guadalajara, Jalisco C.P. 44130. Teléfono: 37771150 ext. 33361 y 33362

Correo electrónico: mguevara@cencar.udg.mx

PARTICIPACIÓN

Su participación en este estudio es voluntaria y sin remuneración económica. Si usted decide retirarse del estudio, lo puede hacer en cualquier momento.

CONSENTIMIENTO

He leído este formato y estoy debidamente informado. Toda interrogante, respecto a mis intereses particulares, ha sido respondida satisfactoriamente. Por consiguiente, estoy de acuerdo en participar en este estudio de manera voluntaria.

Nombre y firma del participante _____

Guadalajara, Jalisco a _____ de _____ de 20__

Anexo 2. Entrevista de Datos Generales**I. DATOS DE IDENTIFICACIÓN**

Fecha: _____ Código de Identificación: _____ Fecha de nacimiento: _____ Edad: _____

Nivel de Escolaridad: _____ Carrera: _____ Años de estudio: _____

Ocupación: _____

Lateralidad (Mano con la que escribe): _____ Estado civil: _____

II. SALUD

¿Cómo calificaría su estado de salud actual?

Muy bueno malo Bueno Regular Malo Muy

¿Padece alguna enfermedad crónica orgánica, psiquiátrica o neurológica?

NO SÍ

¿Cuál? _____

III. Consumo de sustancias

Alcohol _____

Tabaco _____

Otros _____

Edad de inicio de consumo _____

Frecuencia _____

IV. ACCIDENTES

V. ENFERMEDADES INFECCIOSAS

VI. TRATAMIENTOS PSIQUIÁTRICOS O NEUROLÓGICOS

VII. SUEÑO

Horas al día _____

Anexo 3. Inventario Edimburgo (Lateralidad)**Inventario de Edimburgo**

El siguiente cuestionario tiene como objetivo que indiques la preferencia del uso de tus manos. Trata de contestar las preguntas después de leer cuidadosamente las instrucciones.

- a) Marca + en la columna apropiada para indicar la preferencia del uso de tus manos.
- b) Marca ++ en la columna apropiada cuando tu preferencia es muy fuerte y nunca trataría de usar la otra mano a menos que seas completamente forzado a hacerlo.
- c) Contesta todas las preguntas y solo deja en blanco si no tienes experiencia de la tarea u objetivo requerido.

	IZQUIERDA	DERECHA
<i>1. Escribiendo</i>		
<i>2. Dibujando</i>		
<i>3. Lanzando</i>		
<i>4. Cortando con tijeras</i>		
<i>5. Cepillándote los dientes</i>		
<i>6. Cortando con cuchillo, sin tenedor</i>		
<i>7. Tomando la cuchara</i>		
<i>8. ¿Con cuál pie prefieres patear?</i>		
<i>9. Encendiendo un cerillo (fósforo)</i>		
<i>10. Abriendo un frasco</i>		

Total + 's:

Anexo 4. Neuropsi Subescalas Atención y Concentración

1. Atención y concentración. Retención de dígitos en progresión.

“Le voy a leer una serie de número, cuando termine usted me los repite en el mismo orden”. Si logra repetir el primer ensayo, se pasa a la serie siguiente (de mayor número de dígitos). Si fracasa aplique los dos ensayos. Suspender después de dos fracasos consecutivos.

4-6-2	3	3-5-9-1	4	5-9-3-2-1	5	3-5-1-2-7-6	6	6-4-1-7-2-4-9	7	2-8-7-3-5-9-1-6	8
6-7-3	3	6-8-2-4	4	4-2-1-5-7	5	6-9-2-5-7-1	6	7-3-6-8-2-1-4	7	4-3-7-8-1-2-7-5	8

5-6-2-8-3-5-3-1-7	9
3-7-1-6-2-4-8-9-5	9

Total _____ (9)

Rango _____ Puntuación normalizada _____

2. Atención y concentración. Cubos en progresión.

Coloque los cubos sobre el diagrama adjunto, de manera que los números queden visibles para usted, pero no para la persona evaluada. Lea las siguientes instrucciones: “Voy a señalar una serie de cubos, cuando termine usted deberá señalarlos en el mismo orden” Si logra repetir el primer ensayo, se pasa a la serie siguiente. Si fracasa aplique los dos ensayos. Suspender después de dos fracasos consecutivos.

8-9-1	3	4-6-7-3	4	8-1-6-2-9	5	7-3-5-9-7-4	6	5-2-4-8-5-3-6	7	3-6-8-1-4-9-1-5	8
5-9-2	3	2-5-8-3	4	3-7-9-5-3	5	6-8-3-4-5-1	6	4-1-6-3-7-9-2	7	6-9-7-1-8-2-3-4	8

4-8-1-5-7-2-3-9-6	9
1-8-2-9-7-3-4-6-5	9

Total _____ (9)

Rango _____ Puntuación normalizada _____

3. Atención y concentración. Detección Visual.

“Esta tarea consiste en marcar con una cruz todas las figuras que sean iguales a esta : Tiene un minuto para marcar las figuras”.



- ✓ Suspensión de la actividad una vez transcurrido 60 segundos.
- ✓ Intrusiones: cuando se marca otra figura diferente a la estrella.
- ✓ Aciertos: número de estrellas que marca el sujeto.
- ✓ Se da un punto adicional por la que se marcó como ejemplo.
- ✓ Puntuación máxima de 24 puntos.

Intrusiones _____ Total _____ (24)

Rango _____ Puntuación normalizada _____

4. Atención y concentración. Detección de dígitos.

- ✓ Leer números en secuencia horizontal
- ✓ Leer un dígito por segundo con velocidad y volumen constantes.
- ✓ Se califican los aciertos e intrusiones de cada parte.

“Vamos a hacer un ejemplo de la tarea siguiente. Le voy a leer una lista de números y cada vez que escuche un dos e inmediatamente después un cinco, usted deberá dar un pequeño golpe en la mesa”

3 9 **2** **5** 1 2 4 7 1 **2** **5** 3 5

Ahora le voy a leer otra lista de números y, al igual que en el ejemplo anterior, cada vez que escuche un dos e inmediatamente después un cinco, usted deberá dar un pequeño golpe en la mesa”

1 ^a mitad	7	8	2	5	1	3	9	4	7	2	6	9	3
	8	7	3	8	5	7	6	2	5	8	3	9	6
	7	2	5	1	6	3	8	4	9	1	3	6	9
	4	7	3	9	1	2	5	3	1	8	5	3	5
	1	7	2	6	2	5	4	3	8	2	9	4	1
2 ^a mitad	6	2	7	1	9	5	4	3	6	1	8	2	5
	4	3	6	9	7	3	1	8	2	5	4	6	3
	8	1	7	2	5	4	6	9	3	4	8	1	3
	6	2	1	3	9	6	2	7	2	5	4	8	3
	7	5	4	3	1	8	5	9	2	5	8	7	9

Primera mitad

Aciertos _____

Intrusiones _____

Total (10) _____

Segunda mitad

Aciertos _____

Intrusiones _____

Rango _____

P. Normalizada _____

5. Atención y concentración. Series Sucesivas

- ✓ Suspensión de la actividad una vez transcurrido 45 segundos.

“Le voy a pedir que cuente de tres en tres empezando con el uno hasta llegar al cuarenta, por ejemplo, 1, 4, continúe usted hasta el cuarenta”.

1, 4, 7, 10, 13, 16, 19, 22, 25, 28, 31, 34, 37, 40

Se califica:

- ✓ 3 puntos: en menos de 45 segundos sin errores.
- ✓ 2 puntos: en 45 segundos sin errores.
- ✓ 1 punto: en menos de 45 segundos con un error.
- ✓ 0 puntos: si comete más de un error, independientemente del tiempo.

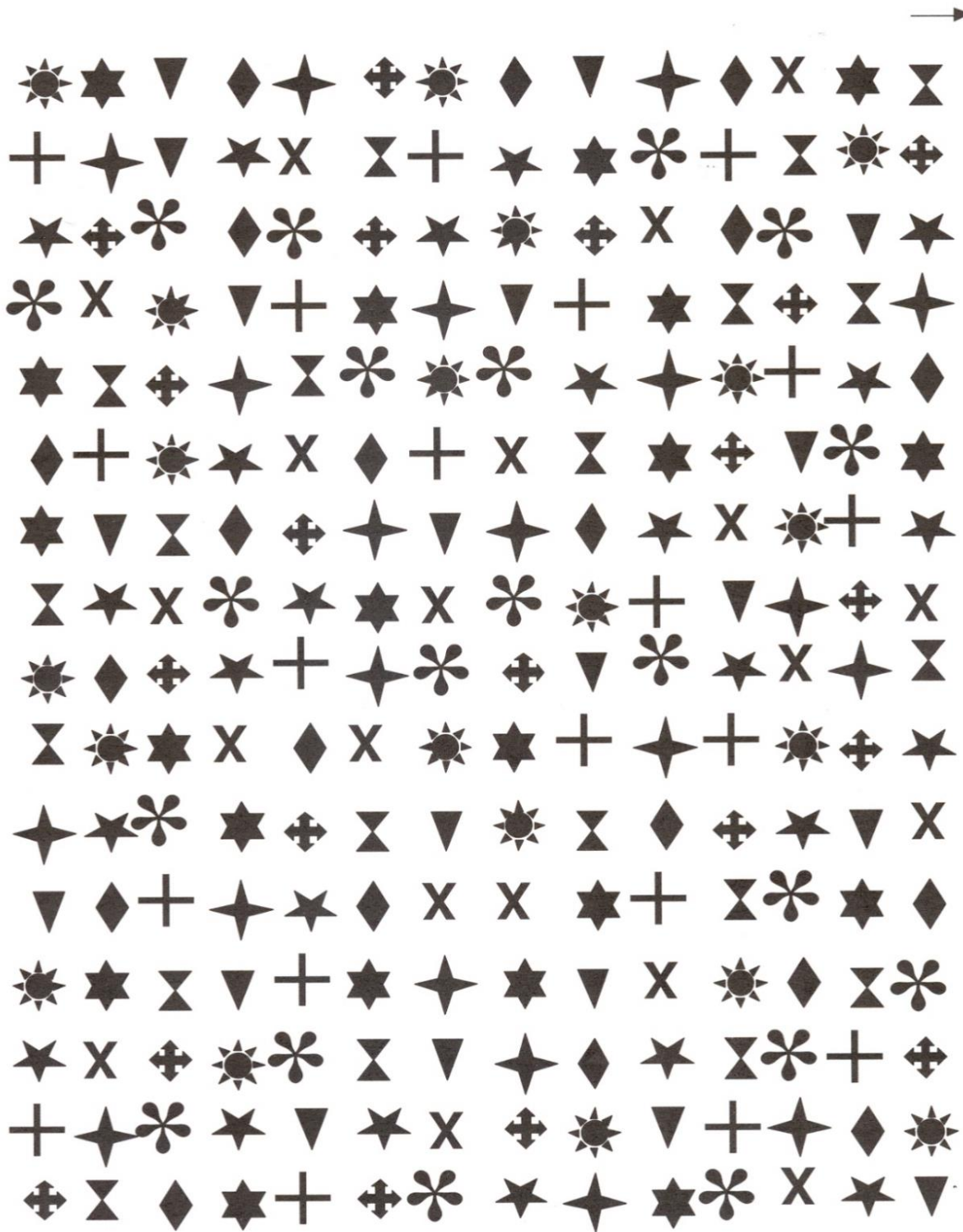
Tiempo _____

Total (0, 1, 2, 3) _____

P. Normalizada _____

Rango _____

Hacia abajo



Anexo 5. Escala de Inteligencia de Wechsler para Adultos

1. Diseño con cubos

(Tiempo límite: véase reactivo)

Inicio
Edades de 16 a 90 años:
reactivo muestra, después reactivo 5

Inversión
Si obtiene puntuación de 0 en el reactivo 5 o 6, aplique los reactivos anteriores en orden **inverso** hasta obtener dos puntuaciones perfectas consecutivas.

Discontinuación
Después de dos puntuaciones consecutivas de 0

Puntuación
Reactivos del 1 al 4: otorgue 0, 1 o 2 puntos.
Reactivos del 5 al 8: otorgue 0 o 4 puntos.
Reactivos del 9 al 14: otorgue 0, 4, 5, 6 o 7 puntos.
DCS
Reactivos del 1 al 4: otorgue 0, 1 o 2 puntos.
Reactivos del 5 al 14: otorgue 0 o 4 puntos.

	Diseño	Forma de presentación	Tiempo límite	Tiempo empleado		Diseño construido		Puntuación				
				Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 1	Ensayo 2					
16-90	M. Examinado Examinador	Modelo y dibujo	30"	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 1	Ensayo 2					
1.		Modelo y dibujo	30"	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 1	Ensayo 2	0	1	2		
2.		Modelo y dibujo	30"	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 1	Ensayo 2	0	1	2		
3.		Modelo y dibujo	30"	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 1	Ensayo 2	0	1	2		
4.		Modelo y dibujo	30"	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 1	Ensayo 2	0	1	2		
16-90	5. Examinado Examinador	Dibujo	60"					0	4			
6.		Dibujo	60"					0	4			
7.		Dibujo	60"					0	4			
8.		Dibujo	60"					0	4			
9.		Dibujo	60"					0	31-60	21-30	11-20	1-10
									4	5	6	7
10.		Dibujo	60"					0	31-60	21-30	11-20	1-10
									4	5	6	7
11.		Dibujo	120"					0	76-120	61-75	31-60	1-30
									4	5	6	7
12.		Dibujo	120"					0	76-120	61-75	31-60	1-30
									4	5	6	7
13.		Dibujo	120"					0	76-120	61-75	31-60	1-30
									4	5	6	7
14.		Dibujo	120"					0	76-120	61-75	31-60	1-30
									4	5	6	7

Puntuación natural total para
Diseño con cubos sin bonificación por tiempo (DCS)
(Máxima = 48)

Puntuación natural total para
Diseño con cubos
(Máxima = 66)

5. Vocabulario



Inicio

Edades de 16 a 90 años:
reactivo 5.

Inversión

Si obtiene puntuación de 0 o 1 en el reactivo 5 o 6, aplique los reactivos anteriores en orden **inverso** hasta obtener dos puntuaciones perfectas consecutivas.

Discontinuar

Después de tres puntuaciones consecutivas de 0.



Puntuación

Reactivos del 1 al 3: otorgue 0 o 1 punto.
Reactivos del 4 al 30: otorgue 0, 1 o 2 puntos.
Véase el Manual de aplicación para respuestas muestra.

Reactivo	Respuesta	Puntuación
1. Libro		0 1
2. Avión		0 1
3. Canasta		0 1
†4. Manzana		0 1 2
16-90 5. Finalizar		0 1 2
6. Cama		0 1 2
†7. Guante		0 1 2
8. Desayuno		0 1 2
9. Consumir		0 1 2
10. Armar		0 1 2
11. Tranquilo		0 1 2
12. Meditar		0 1 2
13. Remordimiento		0 1 2
14. Evolucionar		0 1 2
15. Diverso		0 1 2

† Si el examinado no obtiene una puntuación perfecta, brindar la retroalimentación correctiva indicada en el Manual de Aplicación.

continúa

WAIS-IV Protocolo 7

5. Vocabulario (continuación)

Discontinuar después de tres puntuaciones consecutivas de 0.

Reactivo	Respuesta	Puntuación		
16. Obstruir		0	1	2
17. Generar		0	1	2
18. Curioso		0	1	2
19. Fortaleza		0	1	2
20. Abominable		0	1	2
21. Agudo		0	1	2
22. Tangible		0	1	2
23. Compasión		0	1	2
24. Plagiar		0	1	2
25. Confiar		0	1	2
26. Renuente		0	1	2
27. Osado		0	1	2
28. Mitigar		0	1	2
29. Pragmático		0	1	2
30. Diatriba		0	1	2

Puntuación natural total para Vocabulario
(Máxima = 57)

Acta de Comité de Ética



UNIVERSIDAD DE GUADALAJARA
CENTRO UNIVERSITARIO DE CIENCIAS
BIOLÓGICAS Y AGROPECUARIAS

INSTITUTO DE NEUROCIENCIAS

COMITÉ DE ÉTICA

DICTAMEN DEL COMITÉ DE ÉTICA AL PROYECTO DE
INVESTIGACIÓN

EFFECTO DEL APRENDIZAJE INVERSO SOBRE LA FUNCIONALIDAD CORTICAL
DURANTE LA TOMA DE DECISIONES EN HOMBRES JÓVENES.

CON NÚMERO DE REGISTRO : ET112019-288

RESPONSABLE: Dr. Miguel Angel Guevara

NOMBRE DEL ALUMNO: Juan Pablo García Hernández

APROBADO:

RECHAZADO :

SUGERENCIAS:

RECHAZADO DEBIDO A:

Proyecto: EFECTO DEL APRENDIZAJE INVERSO SOBRE LA FUNCIONALIDAD CORTICAL DURANTE LA TOMA DE DECISIONES EN HOMBRES JÓVENES.

Registro : ET112019-288

En caso de haber sido evaluado con sugerencias, se requiere someter a re-evaluación el proyecto de investigación, en primera instancia, al comité tutelar y posteriormente al Comité de Ética en un lapso máximo de 2 semanas a partir de esta fecha.

Se emite el presente DICTAMEN el día 03 de Agosto
de 2020, firmando los integrantes del Comité de Ética del Instituto de Neurociencias.

Presidente


Dr. Jorge Juárez González

Secretario


Dr. Mario Treviño Villegas

Vocales:


Dr. Jacinto Bañuelos Pineda


Dr. Luis Francisco Cerdán Sánchez


Dr. Horacio Rivera Ramírez


Dra. Araceli Sanz Martín

Ccp. Comité Tutelar correspondiente.